

# ***ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 3D DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS***

**TRABAJO FIN DE GRADO**



**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Autor: Juan Francisco Rodríguez Buenestado**

**Tutor: Daniel Gómez Lendínez**

**Octubre de 2017**



Universidad  
Carlos III de Madrid



## AGRADECIMIENTOS

---

El resultado de este proyecto principalmente se lo tengo de agradecer a mi familia debido a que siempre me han apoyado, ayudado e incluso recordándome siempre que debía estudiar y conseguir buenos resultados para llegar a tener un buen futuro.

Como no también agradecérselo a todos mis compañeros de la carrera, ya que todos hemos tenido que pasar por momentos duros, pero con recompensas, al final, merecidas y siempre ayudándonos unos a otros como hemos podido.

Agradecimientos a la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, a todos los profesores y personas trabajadoras que velan porque la Universidad siga siendo un centro docente de prestigio y por ayudarme con buenos conocimientos y recursos fundamentales para el desarrollo de mi carrera profesional. Y agradecer sobre todo al profesor Daniel Gómez Lendínez, por ayudarme en la realización de este proyecto.



## RESUMEN

---

El objetivo de este proyecto es llegar a simular y comprobar el funcionamiento de un aerogenerador tripala con rotor de eje horizontal y así, hacer ver la cantidad de potencia y en su defecto, energía eléctrica, que se puede obtener limpiamente.

El proyecto empezará con una introducción de la historia de los aerogeneradores, desde sus inicios hasta la actualidad, estudiando los diferentes tipos de aerogeneradores que existen y cuáles han sido sus funciones en la historia. Se pasará a presentar las diferentes partes de las que dispone un aerogenerador, desde la parte estructural que lo sostiene hasta la parte mecánica con la que gracias a ella se obtiene la energía eléctrica.

Posteriormente, se realizarán los cálculos oportunos para el diseño del aerogenerador. Se creará la estructura del aerogenerador en 3D gracias a un software de diseño CAD y se simulará el aerogenerador mediante la dinámica computacional de fluidos (CFD) en un software CAE.

La parte final será la discusión de los resultados y las mejoras o desarrollos futuros que se puedan realizar en el aerogenerador. Además, se analizará el presupuesto que tendría el realizar el proyecto.

## ABSTRACT

---

The aim of this project is to simulate and verify the real conditions of a 3 blade wind turbine with horizontal rotor. Moreover, to check the electric power that can be obtained.

The project will begin with an introduction of the history of wind turbines, from its beginnings to the present, studying the different types of wind turbines that exist and what functions they have been in history. The different parts of a wind turbine will be presented, from the structural part that supports it to the mechanical part, thanks to the electric power is obtained.

Subsequently, the appropriate calculations will be made for the design of the wind turbine. The structure of the wind turbine will be created in 3D thanks to CAD design software and the wind turbine will be simulated using computational fluid dynamics (CFD) in CAE software.

The final part will be the discussion of the results and future improvements or developments that can be made in the wind turbine. In addition, I will analyse the budget that would cost the project.



## ÍNDICE

---

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>3</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>4</b>
<b>Índice .....</b>	<b>5</b>
<b>Índice de tablas y figuras .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Tipos de aerogeneradores.....</b>	<b>13</b>
2.1. Aerogeneradores de eje vertical .....	13
2.2. Aerogeneradores de eje horizontal .....	16
<b>3 Estado del arte .....</b>	<b>19</b>
<b>4 Componentes de los aerogeneradores .....</b>	<b>22</b>
4.1. Rotor.....	22
4.2. Góndola .....	25
4.3. Torre .....	32
4.4. Cimentación .....	32
<b>5 Metodología.....</b>	<b>33</b>
<b>6 Teoría aplicada .....</b>	<b>34</b>
<b>7 Cálculo teórico.....</b>	<b>42</b>
<b>8 Diseño de la geometría en 3d.....</b>	<b>43</b>
8.1. Diseño de la torre .....	43
8.2. Diseño de la góndola .....	46
8.3. Diseño de la nariz .....	47
8.4. Diseño del buje.....	48
8.4. Diseño de los álabes .....	50
8.5. Ensamblaje del aerogenerador .....	61
<b>9 Simulación cfd .....</b>	<b>63</b>
9.1. Introducción a la dinámica de fluidos computacional .....	63
9.2. Discretización espacial .....	65
9.3. Discretización de las ecuaciones .....	67



9.4. Discretización temporal .....	69
9.5. Condiciones de contorno e iniciales.....	72
9.6. Ventajas e inconvenientes de la dinámica de fluidos computacional .....	73
9.7. Ansys .....	74
9.8. Design modeler .....	74
9.9. Mallado de la estructura .....	82
9.10. Fluent y setup .....	87
<b>10 Análisis de los resultados .....</b>	<b>94</b>
10.1. Velocidad .....	94
10.2. Presión .....	97
10.3. Turbulencia y viscosidad de turbulencia.....	100
10.4. Fuerzas y momentos.....	102
<b>11 Conclusiones .....</b>	<b>105</b>
<b>12 Mejoras o desarrollos futuros .....</b>	<b>107</b>
<b>13 Timeline .....</b>	<b>109</b>
<b>14 Presupuesto .....</b>	<b>111</b>
<b>15 Bibliografía .....</b>	<b>114</b>
<b>16 Anexo Planos.....</b>	<b>116</b>



## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1: Aerogenerador Savonius	14
Figura 2: Aerogenerador Giromill	15
Figura 3: Aerogenerador Darrieus	16
Figura 4: Rotor multipala	17
Figura 5: Aerogenerador Tripala	18
Figura 6: Aerogenerador Hywind	19
Figura 7: Aerogenerador sin aspas Vortex	20
Figura 8: Aerogenerador Wind Tree	21
Figura 9: Partes de un aerogenerador	22
Figura 10: Rotor de un aerogenerador	23
Figura 11: Ejemplos de fabricación de palas de aerogenerador	23
Figura 12: Buje de un aerogenerador	24
Figura 13: Nariz de un aerogenerador	25
Figura 14: Componentes de la góndola	25
Figura 15: Multiplicador de un aerogenerador	26
Figura 16: Generador asíncrono de jaula de ardilla	27
Figura 17: Interior de un generador asíncrono de jaula de ardilla	27
Figura 18: Generador de inducción bifásico	28
Figura 19: Esquema de un generador de inducción bifásico	28
Figura 20: Sensor de vibraciones	29
Figura 21: Sistema de freno aerodinámico	29
Figura 22: Sistema de freno mecánico	30
Figura 23: Sistema de control	30
Figura 24: Sistema de orientación	31
Figura 25: Cimentación de un aerogenerador	32
Figura 26: Modelo de Betz	35
Figura 27: Función de densidad de potencia	39
Figura 28: Curva de potencia y eficiencia energética del aerogenerador Windera S de la empresa Ennera	40
Figura 29: Logo de Solid Works	43
Figura 30: Torre de cimentación	44
Figura 31: Base de la torre de cimentación	44
Figura 32: Croquis de la base de la torre	45
Figura 33: Altura desde la base hasta la góndola	45
Figura 34: Medidas de la góndola	46
Figura 35: Altura de la góndola	46
Figura 36: Nariz del aerogenerador	47



Figura 37: Croquis de la nariz del aerogenerador _____	47
Figura 38: Buje del aerogenerador _____	48
Figura 39: Proceso de extrusión del buje del aerogenerador _____	49
Figura 40: Operación de vaciado para los orificios de los álabes _____	49
Figura 41: Dimensiones de los vaciados en las caras planas del buje del aerogenerador _____	50
Figura 42: Ejemplos de punta de pala _____	51
Figura 43: Torbellino en la punta de la pala _____	51
Figura 44: Partes de un álabe _____	52
Figura 45: Perfil Cóncavo-Convexo _____	53
Figura 46: Perfil Plano-Convexo _____	53
Figura 47: Perfil Biconvexo asimétrico _____	53
Figura 48: Perfil laminar _____	54
Figura 49: Perfil supercrítico _____	54
Figura 50: Perfil del álabe NACA 2415 _____	55
Figura 51: Perfil importado al Solid Works y sus puntos _____	55
Figura 52: Imagen de los 16 planos paralelos _____	56
Figura 53: Pala del aerogenerador formada por los distintos perfiles escalados ____	57
Figura 54: Croquis de la raíz de la pala del aerogenerador _____	58
Figura 55: Proceso de extrusión de la raíz de la pala del aerogenerador _____	58
Figura 56: Pala del aerogenerador creada gracias al comando “recubrir” _____	59
Figura 57: Parte de la pala del aerogenerador en donde se aplica el relleno _____	60
Figura 58: Valor del escalado para la pala del aerogenerador _____	61
Figura 59: Ensamblaje del aerogenerador _____	61
Figura 60: Ilustración de las mallas con puntos en el centro y puntos en los vértices _____	66
Figura 61: Condición de contorno de no deslizamiento (izquierda) y de tangencia (derecha) en el contacto del flujo con una superficie _____	73
Figura 62: Importación de la geometría desde el software CAD al software CAE ____	75
Figura 63: Datos de la traslación y resultado de la misma _____	76
Figura 64: Datos de la operación de escalado _____	76
Figura 65: Resultado de la operación de escalado _____	77
Figura 66: Valores de la operación de rotación del aerogenerador _____	77
Figura 67: Situación del aerogenerador en relación a los ejes de coordenadas ____	78
Figura 68: Superficies creadas en el aerogenerador _____	78
Figura 69: Situación de los planos con respecto del aerogenerador _____	79
Figura 70: Croquis de las circunferencias en los planos _____	80
Figura 71: Cilindro creado por el comando “Skin” _____	80
Figura 72: Datos de la operación “Skin” _____	81





Figura 73: Estructura que resulta de aplicar los booleanos _____	81
Figura 74: Identificación de la entrada con el comando “Named Selections” _____	82
Figura 75: Identificación de la pared con el comando “Named Selections” _____	83
Figura 76: Identificación de la salida con el comando “Named Selections” _____	83
Figura 77: Identificación de las palas del aerogenerador con el comando “Named Selections” _____	83
Figura 78: Identificación del tipo de simulación a realizar _____	84
Figura 79: Parámetros elegidos en el apartado de Sizing para creación de la malla	84
Figura 80: Mallado resultante de la estructura _____	85
Figura 81: Mallado 2 _____	87
Figura 82: Cell Zone Conditions _____	88
Figura 83: Condiciones de contorno de la entrada y de la pared _____	89
Figura 84: Condiciones de contorno a la salida _____	89
Figura 85: Mesh Interfaces, regiones de contacto _____	90
Figura 86: Solution Methods _____	90
Figura 87: Residual Monitors _____	91
Figura 88: Surface Monitors _____	91
Figura 89: Run Calculation _____	92
Figura 90: Solution Initialization _____	92
Figura 91: Velocidad del flujo de aire a su paso por las palas _____	94
Figura 92: Velocidad del aire al atravesar el rotor _____	95
Figura 93: Imagen desde la entrada mostrando el giro del flujo de aire _____	95
Figura 94: Velocidad lineal de las palas del aerogenerador _____	96
Figura 95: Campo de presiones en las palas del aerogenerador _____	97
Figura 96: Perspectiva isométrica del campo de presiones en las palas _____	97
Figura 97: Campo de presiones junto con visualización de la velocidad _____	98
Figura 98: Imagen frontal del campo de presiones junto con giro del flujo _____	99
Figura 99: Presión del fluido aguas abajo del rotor _____	99
Figura 100: Turbulencia del fluido al atravesar las palas _____	100
Figura 101: Desprendimiento de la capa límite _____	100
Figura 102: Turbulencia en la pala del aerogenerador _____	101
Figura 103: Valores de la viscosidad de la turbulencia _____	102
Figura 104: Distribución de cargas en las palas _____	103
Figura 105: Diagrama Gantt _____	110
Tabla 1: Datos de partida _____	41
Tabla 2: Datos de los perfiles de los álabes _____	57
Tabla 3: Elementos y calidades de las mallas creadas _____	86
Tabla 4: Valores de la fuerza sobre el aerogenerador _____	104
Tabla 5: Valores de los momentos sobre el aerogenerador _____	105



Tabla 6: Tiempos del proyecto _____	112
Tabla 7: Costes de las tareas del proyecto _____	113
Tabla 8: Costes en electricidad _____	114
Tabla 9: Coste total del proyecto _____	114



## 1 INTRODUCCIÓN

---

Las energías renovables deben convertirse en el futuro de nuestro planeta. La mayoría de la energía que consumimos actualmente proviene de la explotación de los combustibles fósiles que alberga la Tierra, provocando de esta manera una creciente contaminación del planeta.

Hoy en día ya estamos empezando a vislumbrar las consecuencias del uso descontrolado de las energías no renovables y en el clima y en la vida de la Tierra se está empezando a notar. Los polos se derriten, aumenta el nivel del mar, cambian los ecosistemas, etc, y puede que en un futuro la vida que haya que este planeta no sea tal y como la conocemos. Además, este proceso de aumento de la temperatura media de la Tierra es irreversible, por lo tanto, lo único que podemos hacer es evitar que este proceso vaya a más.

Existen muchos tipos de energías renovables y cada vez habrá más ya que nuestra tecnología cambia y podremos encontrar nuevos métodos para explotar los recursos que nos ofrece la naturaleza, pero sin dañarla y sin provocar grandes cambios en la misma. Se pueden destacar las siguientes:

- Energía eólica.
- Energía solar.
- Energía hidráulica.
- Energía solar térmica.
- Biomasa.
- Energía geotérmica.
- Energía marina.

En este proyecto voy a analizar y simular un aerogenerador por lo que es necesario analizar la situación en la que se encuentra la energía eólica, viendo sus antecedentes, tecnologías y su visión para el futuro.

La energía eólica es la que obtenemos gracias al aprovechamiento del viento. En otras palabras, explotamos la energía cinética del viento y la transformamos en electricidad gracias a los aerogeneradores. Esto se consigue gracias a unas aspas o hélices, colocadas de diferentes maneras, y unidas a su vez a un generador eléctrico consiguiendo así que el movimiento mecánico de las aspas se transforme en electricidad.

Se basan en el viento, es decir, en los movimientos de las masas de aire provocadas por cambios en la temperatura de las mismas y por zonas de bajas y altas



presiones, lo que hace que el aire se desplace de unas zonas a otras, y en diferentes condiciones. Durante el día, el aire que se encuentra sobre los continentes se vuelve más caliente y se eleva ya que su densidad disminuye mientras que el aire que se encuentra sobre los mares y océanos se vuelve más frío aumentando así su densidad y, por tanto, desciende. Gracias a esta variación de la densidad y de la presión durante el día es lo que provoca que el aire se desplace, a mayor o menor velocidad, por la superficie del planeta. Por ello, la energía eólica es la energía más limpia y la más barata que existe. [8]



## 2 TIPOS DE AEROGENERADORES

---

Desde siempre la energía eólica ha sido una de las más utilizadas, ya sea en los barcos de vela del Antiguo Egipto, que datan de unos 3000 a.C. y que usaban el viento para moverse por mares y océanos, o en los molinos de viento, los cuales aparecieron por primera vez en Afganistán en el siglo VII y que utilizaban el viento para mover la piedra y que se pudiese moler el trigo o bombear el agua.

La aparición como tal de un aerogenerador se produjo en 1802 cuando Lord Kelvin tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina para que aprovechara el viento, pero no se pudo extraer electricidad hasta 1850 ya que fue en este año cuando se inventó la dinamo. Más tarde, en 1888, Charles F. Brush creó la primera turbina eólica generadora de electricidad.

En el siglo XX, aparecieron algunos modelos generadores de electricidad para abastecer a las zonas rurales de Estados Unidos y eran capaces de generar 3 KW de potencia. En 1940, aparecieron ya los primeros molinos más grandes y rápidos, los cuales podían generar hasta 1 MW de potencia. Sin embargo, debido a la Segunda Guerra Mundial, esta forma de obtención de energía decayó ya que el petróleo era más barato y energético.

Con la crisis del petróleo de los años 70, se empezó a despertar el interés por esta forma de obtención de energía, pero al no estar muy desarrollada, su implementación era muy cara. Por ello, los gobiernos promovieron su desarrollo, a parte empujados también por las protestas en contra de la energía nuclear, y el coste de esta energía disminuyó considerablemente. Esto destacó especialmente cuando en 1981 se desarrolló un aerogenerador de 55 kW que permitía reducir los costes de generación de electricidad en un 50%. [10]

Desde esa época hasta la actualidad se ha avanzado mucho en la tecnología de los aerogeneradores y por ello, se puede hacer una clasificación de los tipos que existen en la actualidad con sus ventajas y desventajas. Principalmente existen dos tipos:

### 2.1. AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL

- Los aerogeneradores de eje vertical son aquellos destacan por no necesitar dispositivo o mecanismo de orientación ya que debido a su fabricación pueden aprovechar el viento sin importar de dónde provenga. Además, el generador eléctrico puede ir colocado en el suelo. Sin embargo, tiene la desventaja de que para ponerlo en funcionamiento necesitan ser motorizados y su generación de electricidad es menor que los de eje horizontal. Se puede distinguir tres tipos:

- Tipo Savonius: es un rotor que aprovecha la fuerza del viento para convertirla en torsión sobre un eje rotatorio. Fue inventado por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1922. Su forma es la de dos mitades de un cilindro cortadas por la generatriz y desplazadas ligeramente. Tiene la característica que cuando las palas empiezan a girar, existe menos resistencia cuando giran en el sentido opuesto al viento que cuando giran a favor. Pueden funcionar con velocidades bajas del viento y es de las turbinas más económicas que existen. Se usan principalmente cuando el coste es más importante que la productividad energética y es por ello que suelen verse como anemómetros o como dispositivo de enfriamiento, como es el caso del ventilador Flettner, usado en furgonetas y autobuses.



*Figura 1: Aerogenerador Savonius*

- Tipo Giromill: consiste en un conjunto de palas verticales unidas por dos barras al eje vertical y pueden ofrecer potencias de 10 a 20 KW.



*Figura 2: Aerogenerador Giromill*

- Tipo Darrieus: está formado por dos palas biconvexas las cuales están unidas al eje vertical tanto por arriba como por abajo. Fue creado por el ingeniero G.J.M. Darrieus en 1931. Si se pone atención a sus ventajas podemos encontrar buenos rendimiento y capacidad para funcionar con altas velocidades del viento. Sin embargo, entre sus desventajas encontramos la necesidad de motorizar la turbina para que se produzca el arranque de la misma ya que disponen de un par de arranque elevado. Además, también existe la obligación de colocar tensores para asegurar la estabilidad estructural del generador ya que cada una de sus palas sufren tensiones fluctuantes de par debido al efecto sombra.

Aunque no son aerogeneradores que produzcan una cantidad comparable de electricidad como consiguen hacerlo los aerogeneradores de eje horizontal, se han conseguido desarrollar aerogeneradores Darrieus de 625 KW de potencia con 34 metros de diámetro y de 170 KW con 17 metros de diámetro.



*Figura 3: Aerogenerador Darrieus*

## 2.2. AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL

- Los aerogeneradores de eje horizontal son los más utilizados hoy en día. Los aerogeneradores de eje horizontal se diferencian entre ellos por el número de palas del que disponen y por la superficie barrida por las mismas. Se puede decir que en estos aerogeneradores la relación existente entre el número de palas y la superficie barrida es inversa y por ello se pueden distinguir dos tipos de generadores de energía:

➤ **Rotores multipala o aeroturbinas lentas:**

Estos aerogeneradores suelen tener entre 6 y 24 palas. Al no disponer de palas de elevado tamaño, la velocidad incidente del viento en las palas y la velocidad de la punta de las palas es muy similar y, por tanto, su fin consiste básicamente en sistemas de bombeo de agua y no utilizándose en sistemas de generación de electricidad ya que no alcanzan grandes velocidades de giro.





*Figura 4: Rotor multipala*

➤ Rotor tipo hélice o aeroturbinas rápidas:

Estos aerogeneradores disponen de velocidades de punta superiores a la velocidad de incidencia del viento en el rotor, de 6 a 14 veces superiores, lo que les hace muy aptos para la generación de electricidad. Además, no necesitan ser arrancados ya que disponen de un par de arranque muy bajo y se pueden poner en marcha por sí mismos utilizando bajas velocidades del viento.

En estos generadores, es el rotor conectado a las palas los que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. Después de que el viento atraviese las palas del aerogenerador, el movimiento rotacional es transmitido a un multiplicador de velocidad para posteriormente ir al generador eléctrico. Todos los componentes necesarios se sitúan sobre la góndola, la cual se encuentra en la parte más alta de la torre.

Los rotores tipo hélice, al no poder funcionar para un amplio rango de velocidades, disponen de un microprocesador que les permite controlar el arranque, la parada y muchas más variables que surgen mientras se encuentran en funcionamiento. Además, también incorporan numerosos componentes eléctricos, tales como interruptores, protectores de sobretensión y transformadores de intensidad que permite que la electricidad generada se traslade correctamente hacia la red o hacia los puntos de consumo. [4]



*Figura 5: Aerogenerador Tripala*

### 3 ESTADO DEL ARTE

---

Actualmente, los aerogeneradores de eje horizontal que más se están utilizando son los rotores tipo hélice y dentro de éstos, los que tienen tres palas. Los tripala se han escogido por delante de los bipala o los monopala por su alta estabilidad estructural y aerodinámica, menores ruidos y alto rendimiento energético. Sin embargo, los aerogeneradores monopala y bipala presentan otras ventajas como una velocidad de giro superior, relaciones de multiplicación inferiores, así como menores coste de instalación de estos aerogeneradores. Es por ello que he escogido los aerogeneradores tipo hélice de tres palas para la realización de este proyecto. [1]

Poco a poco se está desarrollando cada vez más esta tecnología para que sea más eficiente y más barata. Por ejemplo, en 2014, la capacidad total energética se situaba en 336 GW teniendo a China, Estados Unidos, Alemania, España e Italia como líderes mundiales en instalación de generadores eólicos. Destacan también las instalaciones marinas de aerogeneradores, las cuales empezaron a expandirse en 2009 cuando Noruega instaló la turbina de viento flotante Hywind con un coste que ascendía a los 62 millones de dólares.



*Figura 6: Aerogenerador Hywind*

Existen nuevos proyectos de aerogeneradores, como el que desarrolló la empresa española Deutecno, que creó un aerogenerador sin partes móviles, llamados aerogeneradores sin hélices “Vortex”. Estos aerogeneradores tienen la misión de eliminar los enormes generadores eólicos que se instalan hoy en día y que varían de forma considerable el paisaje en el cual son instalados. Además, pretende conseguir la misma funcionalidad con unos costes más baratos, al igual que reducen los ruidos provocados por los aerogeneradores convencionales. [13]

Estos generadores funcionan utilizando la vibración provocada por el viento cuando éste impacta en un cilindro vertical semirrígido y anclado en el terreno. El cilindro está fabricado con materiales piezoeléctricos y fibra de vidrio o de carbono que permite que cuando el viento incide en ellos, esta estructura se deforme entrando en resonancia y genere la electricidad debido a la deformación producida por el viento.



*Figura 7: Aerogenerador sin aspas Vortex*

Otro reto que se está llevando a cabo son los generadores eléctricos “Wind Tree” que están siendo desarrollados por la empresa norteamericana New Wind. El aerogenerador está compuesto por 72 hojas artificiales, las cuales tienen forma cónica y poca masa llegando a poder generar electricidad con velocidades del viento de hasta 2 metros por segundo. Con sus 72 turbinas (11 metros de alto y 8 metros de diámetro) puede llegar a generar 3.1 KW de potencia funcionando durante 280 días al año. Además, al tener forma de árbol no distorsiona el paisaje donde se instale. [6]



*Figura 8: Aerogenerador Wind Tree*

## 4 COMPONENTES DE LOS AEROGENERADORES

---

Los aerogeneradores tipo hélice de tres palas son los más utilizados hoy en día en todas las instalaciones de generación de electricidad a partir de la energía eólica. Los fabricantes de esta tecnología principalmente invierten en esta tipología de generadores eléctricos y los esfuerzos de mejora para el futuro van en la línea de crear aerogeneradores más grandes y más eficientes. [3]



*Figura 9: Partes de un aerogenerador*

Por ello, para entender mejor estos aerogeneradores es necesario explicar cada una de las partes de las cuales se compone y ver qué función desempeña cada una de ellas. Entre las diferentes partes distinguimos:

### 4.1. ROTOR

Confecciona la parte más importante de los aerogeneradores eólicos ya que es el encargado de la transformación de la energía cinética que tiene el viento en un momento torsor, que se transformará posteriormente en electricidad a través de una serie de mecanismos. Los rotores pueden tener diámetros pequeños como 1 metro o llegar a medir hasta más de 100 metros.





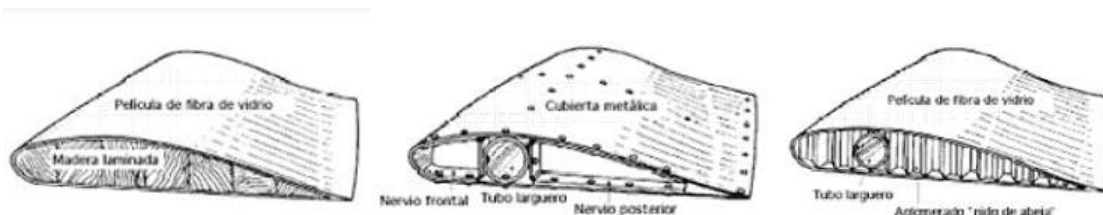
*Figura 10: Rotor de un aerogenerador*

No suelen tener grandes velocidades de giro ya que éstas dependen de la velocidad en punta de la pala y también su velocidad está sujeta a criterios acústicos. El rotor, a su vez, se divide en tres partes:

#### 4.1.1. Palas

Las palas son las partes que soportan toda la fuerza del viento y por ello, son la parte más importante de un aerogenerador. Transforman el movimiento lineal del viento en movimiento de rotación y el cual se transmite al eje del rotor para la posterior generación de electricidad. [15]

Por eso, deben estar fabricadas de materiales resistentes y duraderos ya que estos aerogeneradores suelen tener una vida útil de unos 25 años, pero hay que añadir también que deben ser ligeros. También debemos añadir las inclemencias del clima como, por ejemplo, fuertes vientos o la salinidad propia que sufren los aerogeneradores *offshore* y su consecuente desgaste. Los materiales usados suelen ser epoxis o poliéster reforzados con fibra de vidrio o de carbono. Asimismo, el proceso de fabricación de las palas de un aerogenerador es laborioso.



*Figura 11: Ejemplos de fabricación de palas de aerogenerador*

Las palas de un aerogenerador suelen medir entre 25 y 80 metros. Por ejemplo, las palas de un aerogenerador que produce 1MW, dispone de palas cuya longitud son 27 m. Las palas además disponen de perfiles aerodinámicos, muy parecidos a las alas de un avión, que les permiten captar de la manera más óptima la fuerza del viento y transmitir lo menos posible cargas al resto de la estructura que puedan hacer que ésta sufra.

#### **4.1.2. Buje**

Es el elemento de una máquina donde se apoya y gira un eje. Es un parte muy importante de los aerogeneradores ya que es aquí donde se apoyan las palas y el rotor y es la única parte externa de los aerogeneradores que gira siendo el transmisor de la fuerza del viento al interior de la góndola. [14]

Además, dentro del buje es donde se encuentran los elementos que permiten el cambio de paso o pitch (ángulo de incidencia del viento sobre las palas) y llegando a girarlos entre 0º y 90º. Pueden llegar a colocar la pala en posición de “bandera” que es el modo de seguridad del aerogenerador ante situaciones climatológicas adversas.



*Figura 12: Buje de un aerogenerador*

#### **4.1.3. Nariz**

Es simplemente un elemento aerodinámico con forma de punta y que se coloca en el buje. Su misión es la de redireccionar el viento de enfrente del rotor, viento a barlovento, hacia los respiraderos de la góndola y así evitar turbulencias en la parte frontal del rotor.

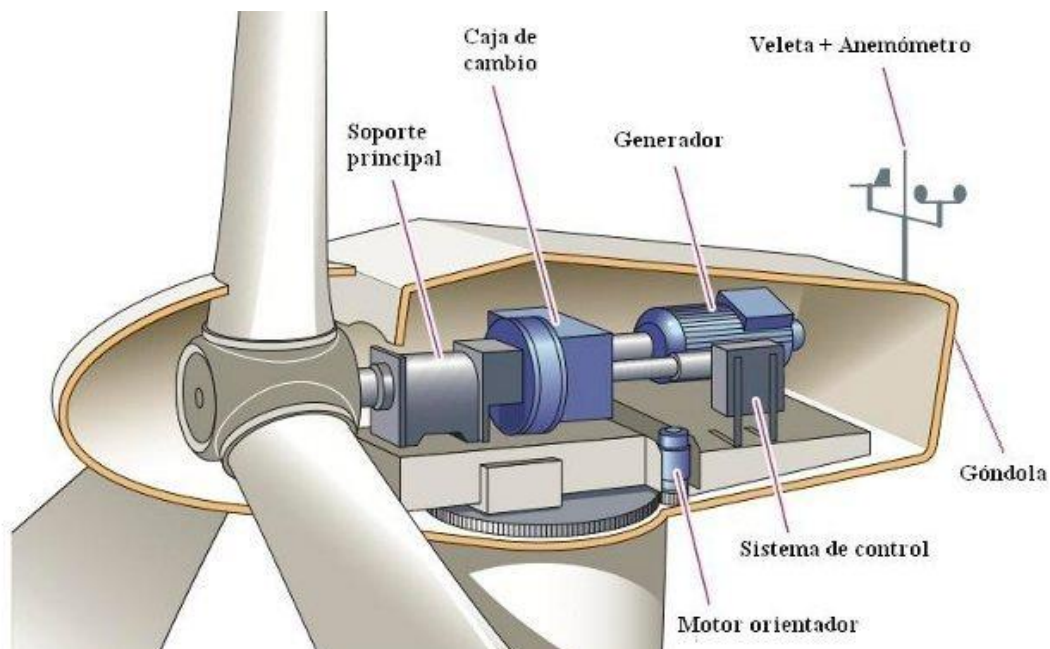




*Figura 13: Nariz de un aerogenerador*

## 4.2. GÓNDOLA

La góndola se considera la sala de máquinas del generador eólico. Está situada en la parte más alta de la torre de cimentación y gira en torno al eje de la torre para poder adecuarse a la dirección del viento y permitir que las palas recojan el máximo de viento. Dentro de la góndola encontramos el eje principal, la caja de cambios, el generador eléctrico, los frenos y el sistema de giro de la góndola.



*Figura 14: Componentes de la góndola*

#### 4.2.1. Multiplicador

La función principal del multiplicador es adecuar la velocidad de rotación del eje principal a la que necesita el generador, debido a que el eje que está conectado al rotor no gira siempre a la misma velocidad. Por ejemplo, una turbina de 1 MW de potencia con un rotor de 52 metros girará a 20 revoluciones por minuto mientras que el generador girará a 1500 revoluciones por minuto.

Esta solución de acoplar un multiplicador entre el eje del rotor y el generador es una solución muy parecida a la utilizada en los automóviles con la caja de cambios. Gracias al multiplicador se puede alternar la potencia de alto par torsor cuando el rotor gira lentamente con la potencia de bajo par torsor pero alta velocidad, que es la mejor para poder utilizarla en el generador. Sin embargo, es más simple que la caja de cambios de un automóvil ya que normalmente suele tener una única relación de multiplicación que aproximadamente es 1:50.



*Figura 15: Multiplicador de un aerogenerador*

#### 4.2.2. Generador

El generador es el componente de los aerogeneradores que se encarga de transformar la energía cinética de rotación en energía eléctrica proveniente del eje del aerogenerador. Existen 3 tipos de aerogeneradores dependiendo del generador eléctrico que monten dichas turbinas y que se diferencian en el comportamiento de cada generador cuando el aerogenerador se encuentra en condiciones por encima de las nominales para evitar sobrecargas:

- Generador de inducción de jaula de ardilla:

Este es el generador que se empezó a utilizar en las primeras turbinas eólicas. Al girar a velocidades diferentes el eje del rotor y el eje del generador se necesita una caja de cambios para poder adecuar las velocidades de los dos ejes. Estos generadores de jaula de ardilla consumen la potencia reactiva de la red eléctrica y es por ello que se tienen que instalar condensadores para mitigar este efecto. También se produce lo que se denomina deslizamiento, que consiste en que el generador de inducción de jaula de ardilla permite pequeñas variaciones en la velocidad del rotor, en torno al 1%. A pesar del deslizamiento, estos generadores eléctricos son conocidos como generadores de velocidad constante y, por tanto, es el nombre que recibe la turbina eólica que monta este tipo de generadores eléctricos.



Figura 16: Generador Asíncrono de Jaula de Ardilla

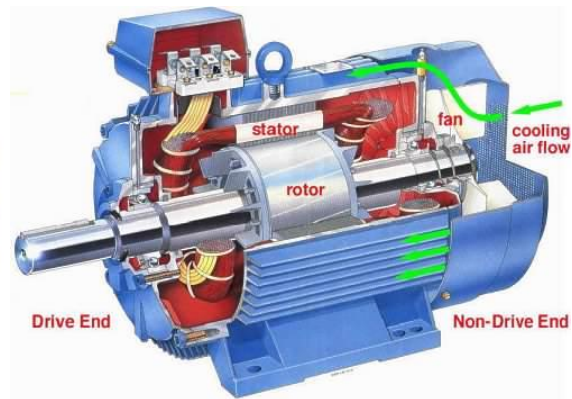


Figura 17: Interior Generador Asíncrono de Jaula de Ardilla

- Generador de inducción bifásico:

Estos generadores tienen que hacer uso de la electrónica de potencia para su funcionamiento debido a que utilizan un primer concepto de velocidad variable. La electrónica de potencia permite que se inyecte una corriente en el devanado del rotor del generador mientras que el devanado del estator está conectado directamente a la red. Debido a que la frecuencia de la corriente que se inyecta en el rotor es variable, las frecuencias eléctricas y mecánicas quedan desacopladas. Esto permite que el generador pueda funcionar con velocidades variables, pero se necesita una caja de cambios para adaptar las velocidades del rotor y del generador.



*Figura 18: Generador de inducción bifásico*



*Figura 19: Esquema Generador de inducción bifásico*

- Generador síncrono:

Estos generadores se caracterizan porque permiten que el aerogenerador prescinda de la caja de cambios ya que utilizan un segundo concepto de velocidad variable. Los generadores síncronos utilizan la electrónica de potencia debido a que el generador y la red se encuentran totalmente desacopladas. Por ello, se montan en las turbinas eólicas generadores especiales que permiten operar con bajas revoluciones, pero, por el contrario, son generadores que necesitan tener diámetros muy grandes.

#### **4.2.3. Sistema de frenado**

Los aerogeneradores, debido a que están diseñados para que duren 20 años y resistan 120.000 horas de vida, tienen que tener mecanismos que permitan el correcto funcionamiento de todos los elementos y que, ante condiciones climáticas desfavorables, se asegure, a través de mecanismos, que el aerogenerador no sufra desperfectos. Para ello existen varios sistemas de prevención ante catástrofes que puedan parar la actividad normal del aerogenerador.

Los sensores son los dispositivos más típicos en todas las máquinas para analizar el entorno y dar una respuesta ante cualquier situación ajena al correcto funcionamiento de la máquina. Los aerogeneradores incorporan un sensor de vibraciones, que simplemente consiste en una bola apoyada sobre un anillo y la cual está unida a un interruptor a través de una cadena. Si el aerogenerador vibra de forma considerable, la bola se caerá del anillo y la turbina se parará. Otros sensores típicos son los utilizados para medir la temperatura del aceite del multiplicador y del generador.



*Figura 20: Sensor de vibraciones*

Otro sistema importante de prevención de averías en los aerogeneradores es el freno aerodinámico instalado en las palas de los mismos. Este sistema consiste en girar  $90^\circ$  las palas del aerogenerador con respecto al eje longitudinal de las mismas, en el caso de turbinas de regulación por cambio en el ángulo de paso o en turbinas de regulación activa por pérdida aerodinámica, o en girar  $90^\circ$  las puntas de las palas del rotor en el caso de turbinas de regulación por pérdida aerodinámica.

Este sistema es muy efectivo porque consigue parar la aeroturbina en unas pocas vueltas del rotor y, además, se produce muy poco desgaste en el proceso de parada de la misma ya que el sistema es hidráulico. También incluye unos resortes para conseguir girar las palas por si se produce algún fallo en el sistema eléctrico del aerogenerador. En cuanto el peligro por el cual la turbina ha entrado en parada cesa, este sistema devuelve al aerogenerador a su situación normal y comienza a funcionar de nuevo.



*Figura 21: Sistema de freno aerodinámico*



El sistema de freno mecánico se utiliza en apoyo al sistema de freno aerodinámico cuando la turbina tiene giradas solo las puntas de las palas  $90^\circ$  para asegurar su parada. Cuando la turbina tiene giradas las palas enteras  $90^\circ$  no hace falta activar debido a que el rotor apenas se mueve. Sin embargo, en trabajos de mantenimiento del aerogenerador, si es necesario activarlo para asegurar su parada y realizar el trabajo de una manera segura.



*Figura 22: Sistema de freno mecánico*

#### **4.2.4. Sistema de control**

El sistema de control de un aerogenerador es muy importante para tener en todo momento monitorizado todas las variables que intervienen en el correcto funcionamiento del mismo y poder prever problemas que dañen la estructura de la turbina. Este sistema de control se encarga de numerosos mecanismos tales como sensores, válvulas, motores, interruptores y bombas hidráulicas instalados en el aerogenerador.



*Figura 23: Sistema de control*

#### 4.2.5. Eje de baja y de alta velocidad

El eje de baja velocidad se corresponde con el tramo de eje que abarca desde el buje del rotor hasta el multiplicador. Este eje contiene elementos del circuito hidráulico que se encarga del funcionamiento del freno aerodinámico. Este eje, en un generador que produzca unos 600 kW de potencia, puede girar a una velocidad de entre 19 a 30 revoluciones por minuto.

El eje de alta velocidad se encuentra entre el multiplicador y el generador y puede llegar a alcanzar velocidades angulares de 1.500 revoluciones por minuto, velocidad a la que funciona el generador eléctrico. Este eje es el que dispone del freno mecánico antes mencionado y utilizado cuando la turbina se para por inclemencias climáticas o por trabajos de mantenimiento.

#### 4.2.6. Sistema de orientación

Debido a que el viento no siempre se desplaza en la misma dirección, es necesario instalar un dispositivo que permita girar la góndola y poner así al rotor en la dirección correcta, es decir, alineado perpendicularmente con la corriente del viento. Si no fuera así, toda la energía cinética que contiene el viento no sería aprovechada y no se estaría obteniendo todo el rendimiento posible para el que está diseñado el aerogenerador. En la figura 24 se puede observar un mecanismo de orientación, el cual consta de una serie de motores, engranajes y frenos por los que la góndola rota sobre la torre permitiendo encarar mejor al viento. El mecanismo de orientación se activa gracias a que el sistema de control lee varias veces por minuto la veleta instalada en la góndola para saber así cual es la dirección del viento en todo momento y si es necesario activar este sistema.

Además, gracias a los mecanismos de orientación del rotor, las palas sufren menos fatiga, ya que el viento incide perpendicularmente, por lo que solo sufren esfuerzos de flexión y compresión en una dirección.



*Figura 24: Sistema de orientación*

### 4.3. TORRE

La torre es la parte que soporta tanto la góndola como el rotor y pueden estar fabricadas de acero, de celosía o de hormigón. Existen también torres tubulares tensadas con vientos pero éstas solo se utilizan para aerogeneradores pequeños.

La mayoría de aerogeneradores utilizan torres tubulares de acero y suelen tener secciones tronco-cónicas, con la sección inferior más ancha que la superior y que pueden llegar a alcanzar alturas de 20 ó 30 metros. Esta variación de sección es utilizada para conseguir mayor resistencia y ahorrar material.

Otra variación son las torres de mástil tensado con vientos con las cuales el coste es mucho menor que las anteriores, pero presenta la dificultad de acceder a los alrededores de la torre, por lo que no se puede instalar en terrenos agrícolas.

Además, la torre representa alrededor de un 20% del valor del aerogenerador por lo que es muy importante optimizar la estructura, pero sin perder resistencia. Claramente se puede observar que mientras más alto se haga el aerogenerador más potencia podremos obtener debido también a que el rotor será de mayor diámetro, pero por otro lado el coste y la resistencia aerodinámica de esa torre será mayor.

### 4.4. CIMENTACIÓN

La cimentación es una parte muy importante de los aerogeneradores, la cual no se ve pero tiene una gran función. Está fabricada de hormigón armado y debe soportar todo el peso y los esfuerzos producidos en el aerogenerador.



*Figura 25: Cimentación de un aerogenerador*





## 5 METODOLOGÍA

---

El análisis y diseño de un aerogenerador está constituido por varias etapas claramente diferenciadas: la primera, la obtención de los datos necesarios para el cálculo y el diseño del aerogenerador; la segunda sería la simulación CFD; y la última, la obtención y análisis de los resultados finales.

Para la creación del aerogenerador en 3D, se va a escoger un perfil de un álabe ya creado, el NACA 2415, y se construirá la pala del aerogenerador. En cuanto a los datos de partida que se utilizarán en la simulación, se impondrá la velocidad del viento, debido a que este valor limita mucho el funcionamiento de los aerogeneradores y por ser la variable por la cual se conseguirá más o menos potencia. Por último, se pasará a analizar los resultados obtenidos y se darán las conclusiones generadas del proyecto. Esto permitirá también dar otras ideas para llegar a realizar mejoras o cambios en el aerogenerador y que se obtengan mejores resultados.

Aunque el camino a seguir parece claramente definido, es posible que en las diferentes etapas a recorrer en la realización del proyecto haya que volver a realizar tareas previamente hechas para llegar a conseguir el fin buscado. Por ejemplo, si en la simulación CFD hay alguna parte del aerogenerador que falle o que necesite un cambio para mejorar la simulación, se tendrá que modificar la geometría o realizar algún cambio en el paso de preparación de la geometría, y seguir probando hasta conseguir las condiciones óptimas.

## 6 TEORÍA APLICADA

Los aerogeneradores consiguen extraer electricidad aprovechando la energía cinética que el aire posee en su movimiento. Como antes se ha dicho, el viento consigue esa energía cinética gracias a las corrientes que se producen y debido a un desigual calentamiento del sol. Esto provoca que el aire caliente, el cual es más ligero que el aire frío, ascienda hasta unos 10 kilómetros a la vez que se desplaza hacia el Polo Norte y el Polo Sur. Una vez que el aire caliente llega a los polos, se encuentra con una zona de bajas presiones provocada por el aire frío y empieza a descender hacia el Ecuador de nuevo. Gracias también a la rotación de la Tierra y su correspondiente efecto Coriolis se producen desplazamientos laterales del viento. [11]

Para poder evaluar la potencia que un aerogenerador es capaz de extraer del viento, debemos evaluar la cantidad de energía cinética de la masa de aire que atraviesa la sección barrida por las palas en una cantidad de tiempo determinada. Esta potencia la podemos expresar en la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia del viento} = \text{Trabajo}/t = E_{\text{cinética}}/t = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 / t \quad (\text{Ec.1})$$

La masa de aire que atraviesa el rotor se puede expresar como el volumen del cilindro que tiene el mismo diámetro que el rotor y en donde la longitud del cilindro se puede expresar como la velocidad del viento por el tiempo que está el viento recorriendo el cilindro.

$$m = \rho \cdot \text{Vol} = \rho \cdot A \cdot L = \rho \cdot A \cdot V \cdot t \quad (\text{Ec.2})$$

en donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $\text{Vol}$  es el volumen del cilindro de aire,  $A$  es la sección de aire barrida por el rotor,  $L$  es la longitud del cilindro de aire,  $V$  es la velocidad del aire y  $t$  es el tiempo que tarda el aire en atravesar ese cilindro de aire.

Si sustituimos la expresión obtenida de la masa en la ecuación de la potencia del aerogenerador, obtenemos la fórmula de la potencia ideal del aerogenerador:

$$\text{Potencia del viento} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 / t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot t \cdot V^2 / t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (\text{Ec.3})$$

Como se puede observar en la fórmula obtenida, la potencia que un aerogenerador puede extraer depende de la velocidad al cubo y es por eso que es necesario limitar a los aerogeneradores para que funcionen hasta una velocidad límite y evitar averías.

A la fórmula anteriormente obtenida de la potencia eólica es necesario añadirle un coeficiente de potencia debido a que el aerogenerador no es capaz de extraer el 100%

de la energía cinética del viento, debido a que el aire tendría que pararse completamente y esto no ocurre. Además, por conservación de la masa, como la velocidad del flujo de aire disminuye al atravesar el rotor, la sección del cilindro de aire debe aumentar. Por tanto, la fórmula de la potencia quedaría:

$$\text{Potencia del viento} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (\text{Ec.4})$$

Este coeficiente de potencia ( $C_p$ ) recibe el nombre de “Límite de Betz”. Este coeficiente cuantifica que no todo el aire que atraviesa el rotor se convierte en potencia y que, además, el aire no se para totalmente pero sí que se ralentiza.

Cuando el viento esté soplando a barlovento, éste poseerá una velocidad  $V_1$  y pertenecerá a la sección transversal del volumen de control de aire  $A_1$ . Cuando el aire esté atravesando las palas del rotor, la velocidad en ese instante es la velocidad útil del aerogenerador  $V$  y la sección será la propia área del rotor  $A$ . Sin embargo, a sotavento del aerogenerador, el aire sale frenado debido a su paso por el rotor y por ello, tanto la velocidad como la sección en ese momento del volumen de control del aire poseen otros valores que a barlovento, a los cuales podemos llamar  $A_2$  y  $V_2$ . [5]

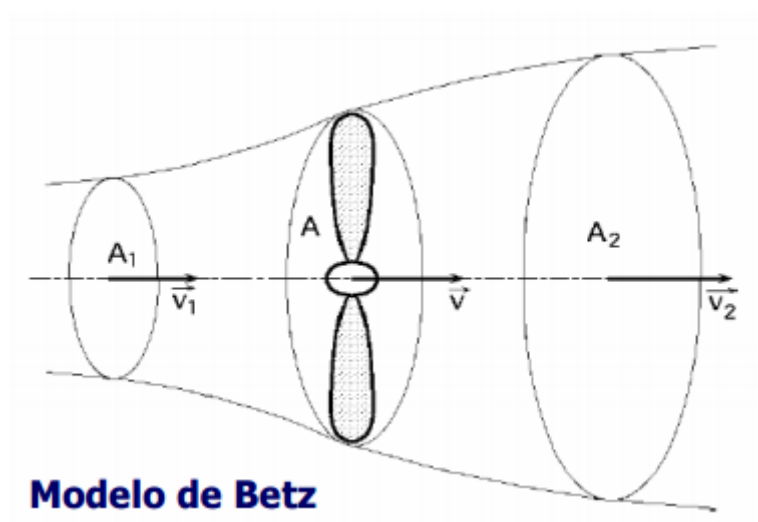


Figura 26: Modelo de Betz

Una vez visto el sentido físico del límite de Betz, se puede calcular su valor siguiendo una serie de pasos. Primeramente, se hace uso de la fórmula de la conservación de la masa, ya que el caudal másico que atraviesa el rotor es constante:

$$Q_m = \rho \cdot Q = \rho \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho \cdot A_2 \cdot V_2 = \rho \cdot A \cdot V \quad (\text{Ec.5})$$

Después de utilizar la expresión del caudal másico, podemos calcular la potencia útil que el viento transfiere al aerogenerador de dos maneras:

- 1) Como la pérdida de energía cinética por unidad de tiempo que sufre el viento al atravesar las palas del rotor:

$$P_{\text{útil}} = \frac{-\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{E_{c1} - E_{c2}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot d \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t} \quad (\text{Ec.6})$$

En esta expresión se ha utilizado como valor de la masa el producto de densidad por volumen y el concepto de  $v = d/\Delta t$ .

- 2) Como el trabajo generado por el viento por unidad de tiempo sobre la sección A:

$$P_{\text{útil}} = Fv = \frac{\rho \cdot A \cdot d \cdot (v_1 - v_2)}{\Delta t} \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{Ec.7})$$

En esta fórmula de la potencia útil podemos observar que, debido a la 3ª ley de Newton, la fuerza del viento es igual a la fuerza ejercida sobre el viento, pero con signo negativo:

$$\text{Fuerza del viento} = -\text{Fuerza sobre el viento} = \frac{-m \cdot (v_2 - v_1)}{\Delta t} = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{Ec.8})$$

Si estas dos ecuaciones de la potencia útil las igualamos, obtenemos:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{Ec.9})$$

Debemos recordar también que  $v$ , la cual es la velocidad del plano medio que se sitúa en el rotor y es la media de las dos velocidades, tanto la de barlovento  $v_1$  como la de sotavento  $v_2$ . Esto es así porque es el modelo que fue diseñado por Betz y hay que utilizarlo así porque si no las dos ecuaciones anteriores de la potencia útil no serían consistentes entre sí. Por lo que queda que el valor de  $v$  es:

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{Ec.10})$$

También se puede observar que  $v_2$  tendrá un valor que dependerá de  $v_1$ , es decir, de la velocidad que lleve el viento cuando vaya a atravesar el rotor. Por ello, se puede escribir una expresión que relacione las dos velocidades,  $v_1$  y  $v_2$ .

$$v_2 = b \cdot v_1 \quad (\text{Ec.11})$$

en donde  $b$  tendrá un valor que estará entre 0 y 1.

Así mismo, volvemos a escribir la expresión de la potencia útil, la ecuación 6, pero sustituyendo estos valores de  $v_2$ .

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{(v_1 + b \cdot v_1)}{2} \cdot (v_1^2 - b^2 \cdot v_1^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot (1 + b) \cdot (1 - b^2) \quad (\text{Ec.12})$$

Una vez conseguida la fórmula de potencia útil con los valores ya introducidos, podemos calcular la expresión de la potencia útil máxima que el aerogenerador podrá extraer del viento, calculando un valor exacto del coeficiente  $b$ . Esto lo podemos conseguir si derivamos la fórmula de la potencia útil con respecto al coeficiente  $b$  e igualando a cero.

$$\frac{dP_{\text{útil}}}{db} = 0 \quad (\text{Ec.13})$$

Si desarrollamos:

$$\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot (1 - 2b - 3b^2) = 0$$
$$-3b^2 - 2b + 1 = 0 \quad (\text{Ec.14})$$

$$b = \frac{2 \pm \sqrt{4 - 4 \cdot 1 \cdot (-3)}}{-6} = \frac{2 \pm \sqrt{16}}{-6} = \frac{2 \pm 4}{-6} = \begin{cases} -1 \\ 1/3 \end{cases} \quad (\text{Ec.15})$$

De la ecuación de segundo grado obtenida, podemos ver los dos valores que nos da de resolver la ecuación. El valor negativo de  $-1$  no podemos tenerlo en cuenta ya que no tiene sentido físico que el valor  $v_2$  tenga el mismo valor que  $v_1$  pero cambiado de signo (el viento tendría que cambiar de sentido). Por lo tanto, el valor de  $b$  será de  $1/3$  y el valor de  $v_2$  será:

$$v_2 = 1/3 \cdot v_1 \quad (\text{Ec.16})$$

Sustituyendo este valor de  $b$  en la fórmula de la potencia útil obtenemos:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot (1 + b) \cdot (1 - b^2) \quad (\text{Ec.17})$$

Para que sea semejante a la fórmula de la potencia que incluía el coeficiente de potencia  $C_p$ , podemos variar la fórmula anterior de la potencia útil para que quede de la siguiente manera:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \frac{(1+b) \cdot (1-b^2)}{2} \quad (\text{Ec.18})$$

en donde el valor de  $C_p$ , el límite de Betz, es:



$$C_p = \frac{(1+b) \cdot (1-b^2)}{2} = \frac{16}{27} \cong \mathbf{59,3 \%} \quad (\text{Ec.19})$$

Este valor obtenido del límite de Betz es el usado para obtener la potencia de un aerogenerador en condiciones ideales de funcionamiento. Fue obtenido por el físico alemán Albert Betz en 1919. Sin embargo, no se tuvo en cuenta otros factores como la resistencia aerodinámica de las palas, la pérdida de energía por la estela generada en la rotación, la compresión del fluido o la interferencia de las palas.

Tampoco, para la obtención de la potencia, se ha tenido en cuenta los diferentes rendimientos mecánicos de los diferentes componentes que tiene el aerogenerador, como pueden ser:

- Rendimiento de la hélice: 85 %
- Rendimiento del multiplicador: 98 %
- Rendimiento del alternador: 95 %
- Rendimiento del transformador: 98 %

Teniendo en cuenta todos los valores de rendimientos de los componentes junto con el límite de Betz, calculamos el rendimiento total del aerogenerador y conseguimos un valor de 46 %.

Hay que tener en cuenta también que existe variabilidad en la velocidad del viento la cual tiene que ver con muchos motivos. Entre ellos está la variabilidad del viento a corto plazo y que es referida a la que se produce por obstáculos o cambios en la superficie local. Existen también localizaciones en donde se producen variaciones en la velocidad del viento dependiendo si es de día o de noche.

Las estaciones provocan igualmente que el viento varíe. Esto se puede ver, por ejemplo, como en las zonas templadas, los vientos de verano suelen ser más lentos que los de invierno. A su vez, el consumo de electricidad también es mayor en las estaciones frías que en las cálidas, y por ello, la obtención de electricidad a partir de la energía eólica en estas zonas es ideal.

Ahora que ya se ha establecido la expresión de la potencia del aerogenerador, podemos calcular la distribución de energía eólica a diferentes velocidades del viento o lo que se traduce como la gráfica de densidad de potencia. Esta gráfica se consigue si multiplicamos la potencia de cada velocidad del viento con la probabilidad correspondiente en la gráfica de Weibull.

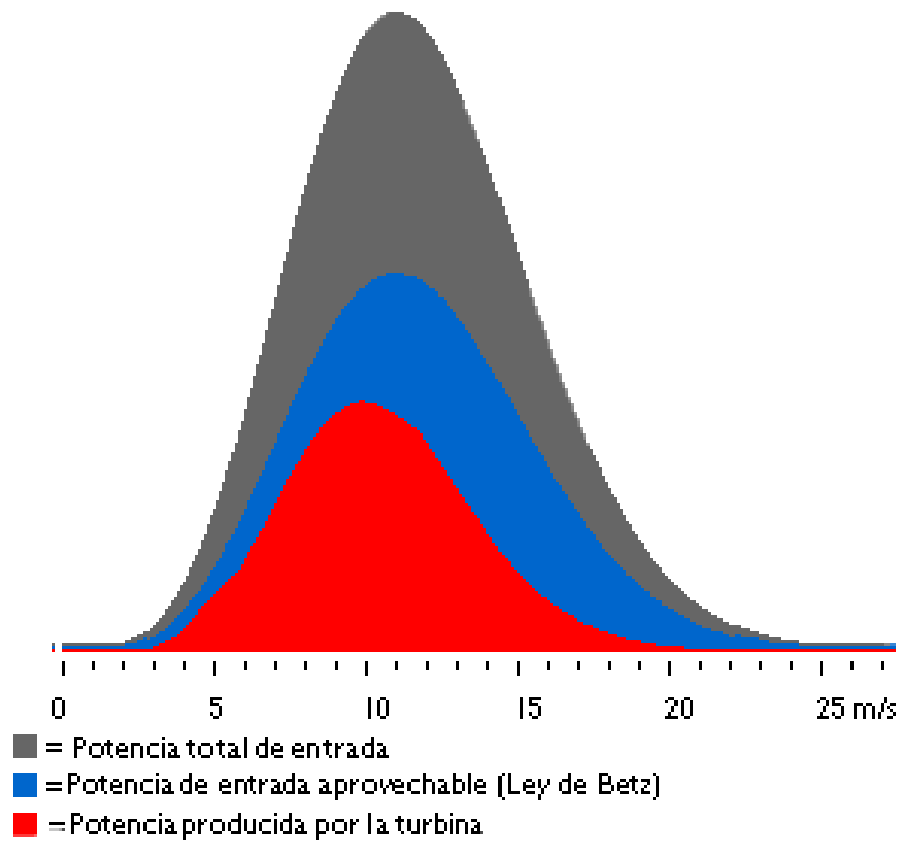


Figura 27: Función de densidad de potencia

En la gráfica se puede observar que el área que se encuentra por debajo de la curva gris representa la cantidad de potencia eólica por metro cuadrado que puede obtenerse. El área bajo la curva azul representa la cantidad de potencia que puede convertirse en potencia mecánica, según el límite de Betz pero sin tener el resto de rendimientos. Por último, el área que se encuentra bajo la curva en rojo muestra la cantidad de potencia eléctrica que puede obtenerse del aerogenerador que se está estudiando.

Si nos fijamos ahora en una curva de eficiencia energética de un aerogenerador, podemos observar que no disponen de un alto rendimiento mecánico (alrededor de un 41%) y suelen darse a velocidad en torno a 8 m/s. Si la velocidad es más baja, el viento no dispone de tanta energía por lo que al aerogenerador le resulta muy difícil extraerla y si la velocidad es muy alta, el aerogenerador debe poder disipar toda esa energía para evitar que se produzcan averías o mal funcionamiento del aerogenerador. Es por ello que no se busca la máxima eficiencia energética para los aerogeneradores, si no que el fin es la obtención de electricidad, utilizando un combustible gratis y, por tanto, que los kWh sean más baratos. Además, mientras más grande sea el aerogenerador, más caro será su coste de fabricación y de mantenimiento, aunque se pueda conseguir obtener más electricidad.

En la figura 28, la curva que se encuentra sombreada es la de potencia y en la que podemos apreciar cual será la cantidad de potencia eléctrica que el aerogenerador será capaz de extraer. Los aerogeneradores están diseñados con límites de velocidades. Una es la velocidad de conexión que suele estar entre los 3-5 m/s, y la cual se puede apreciar en la gráfica. La otra es la velocidad de corte en donde el aerogenerador se parará para evitar fallos y la cual suele estar establecida para los 25 m/s.

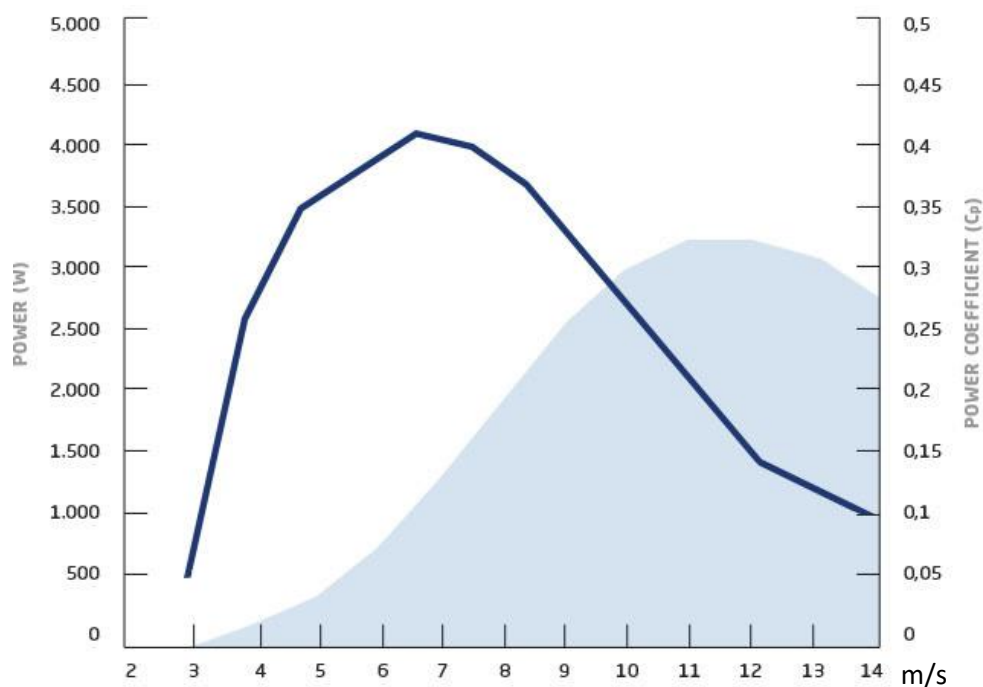


Figura 28: Curva de potencia y eficiencia energética del aerogenerador Windera S de la empresa Ennera.

La turbulencia juega un papel clave en el comportamiento de los aerogeneradores. La turbulencia se define como el movimiento caótico y desordenado de un fluido y se puede observar debido a la presencia de remolinos. Estas turbulencias surgen por la relación que existe entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en un fluido. Cuando las fuerzas viscosas son mayores que las inerciales, éstas amortiguan a los remolinos que se crean y el flujo es laminar. Pero cuando las fuerzas inerciales superan a las viscosas, éstas no son capaces de amortiguar y se producen los remolinos propios de un flujo turbulento.

Las turbulencias se generan cuando el aire incide sobre el rotor de un aerogenerador ya que el rotor provoca que el aire pierda velocidad, que se aumente la presión en ese punto y un cambio brusco de la dirección del aire. No interesa en ningún caso que las palas de aerogenerador provoquen turbulencias debido a que afecta negativamente sobre la estructura del aerogenerador y da lugar a fatiga en los materiales y a una disminución de la eficiencia energética de la turbina eólica.



Para poder saber que valores de la turbulencia se obtienen en diferentes situaciones existen distintos modelos que explican su comportamiento. En nuestro caso, se ha elegido, teniendo en cuenta el comportamiento del aerogenerador y la posterior realización de la simulación, el modelo  $k-\varepsilon$ . Este modelo pertenece a lo que se conoce como modelos RANS (Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes). Estos modelos RANS se basan en la promediación de las ecuaciones del fluido, para lo cual todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio junto con una componente fluctuacional. Después de realizar esta promediación, se obtienen términos adicionales que requieren la adición de otras ecuaciones para cerrar el sistema. Dentro de estos modelos RANS, existen diferentes métodos de solución para estos modelos, como son los modelos de cero ecuaciones, de una ecuación, de dos ecuaciones y de más de una ecuación. El modelo  $k-\varepsilon$  elegido pertenece al modelo de dos ecuaciones.

El modelo  $k-\varepsilon$  incorpora dos ecuaciones de balance en derivadas parciales en las que interrelacionan la energía cinética del fluido turbulento  $k$  y su velocidad de disipación  $\varepsilon$  al sistema de ecuaciones del fluido. Las dos ecuaciones que forman parte de este método son:

- Ecuación para la energía cinética de turbulencia:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{Ec. 20})$$

- Ecuación para la velocidad de disipación:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Ec.21})$$

Donde  $u_i$  representa la componente de la velocidad en la correspondiente dirección,  $E_{ij}$  representa la matriz de deformación y  $\mu_t$  representa la viscosidad de turbulencia. [12]

Una vez que se han evaluado estas dos ecuaciones, se puede determinar la viscosidad turbulenta:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec.22})$$

Las ecuaciones también tienen constantes en la fórmula y sus valores son:

$$C_\mu = 0.09; \quad \sigma_k = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.30; \quad C_{1\varepsilon} = 1.44; \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

## 7 CÁLCULO TEÓRICO

Para poder obtener los datos del aerogenerador es necesario tener conocimiento de algunos datos de partida que condicionen el comportamiento de nuestro aerogenerador.

Los datos de partida se encuentran reflejados en la siguiente tabla:

Variables del aerogenerador	Valor
Aire	Gas ideal
Densidad	1,2 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura del aire	20°C
Presión a la entrada	1 bar
Velocidad a la entrada	12 m/s
Velocidad del rotor	2,5 rad/s
Diámetro del rotor	56 m
Límite de Betz ( $C_p$ )	59,3 %
Rendimiento de la hélice	85 %
Rendimiento del multiplicador	98 %
Rendimiento del alternador	95 %
Rendimiento del transformador	98 %
Ángulo de las palas	22°

Tabla 1: Datos de partida

Según las ecuaciones escritas anteriormente, la potencia extraída de un aerogenerador obedece a la siguiente expresión:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot C_p$$

en donde el área del rotor es

$$A = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \pi \left( \frac{56}{2} \right)^2 = 2463,00864 \text{ m}^2$$

Así, la potencia útil extraída de nuestro aerogenerador será:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot C_p = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 2463,00864 \cdot 12^3 \cdot 0,593 = 1514312,883 \text{ W}$$

A esta potencia hay que aplicarle también los valores de los rendimientos que corresponden con el rendimiento de la hélice, del multiplicador, del alternador y del transformador, por lo que la potencia real extraída será:

$$P_{\text{real extraída}} = 1514312,88 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 1174383,47 \text{ W}$$

## 8 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA EN 3D

---

Para la construcción de la geometría en 3D se ha utilizado el software CAD (diseño asistido por computadora) *Solid Works*, debido a que permite el desarrollo de modelos en 3D y permite la construcción virtual de los mismos.

El software fue creado por Edson Hernández en 1993 bajo el nombre empresarial Dassault Systèmes Solidworks Corp. y su primer producto fue lanzado en 1995. Dispone de varios productos o sectores, los cuales están disponibles para los usuarios que lo utilicen tales como simulación, gestión de datos, diseño eléctrico, diseño 2D, diseño mecánico y comunicación. Además, es usado en sectores de la industria tales como el automotriz, aeroespacial, plantas industriales, alta tecnología, maquinaria o productos más utilizados por el consumo cotidiano. Por último, decir que es utilizado en más de 85 países, por más de 180.000 empresas y 27.000 universidades.



*Figura 29: Logo de Solid Works*

En todo este tipo de programas de diseño computacional el camino a seguir siempre es el mismo, ya que primero se deben diseñar los croquis o bocetos que luego se consoliden como las superficies de la estructura que se quiera construir. Después de tener estas superficies se pasará a unir las y darles espesor para que el resultado final sea el que se quiera.

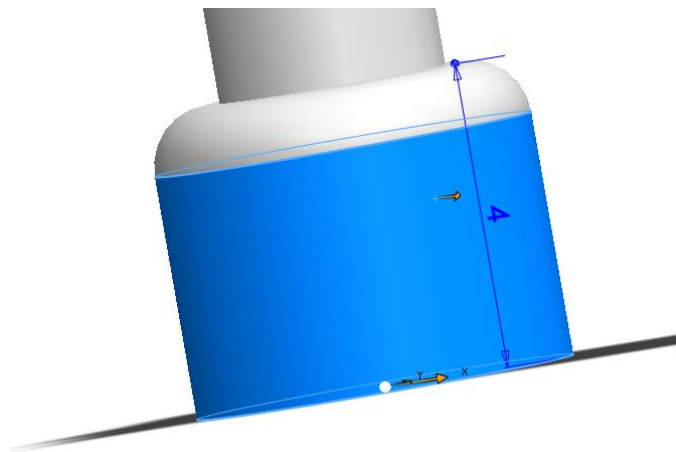
### 8.1. DISEÑO DE LA TORRE

Lo primero que diseñé fue la torre de cimentación ya que consideraba que era una parte de mi estructura que me resultaría fácil y sencilla de hacer y no dependía tanto de mis resultados obtenidos en los cálculos previos.



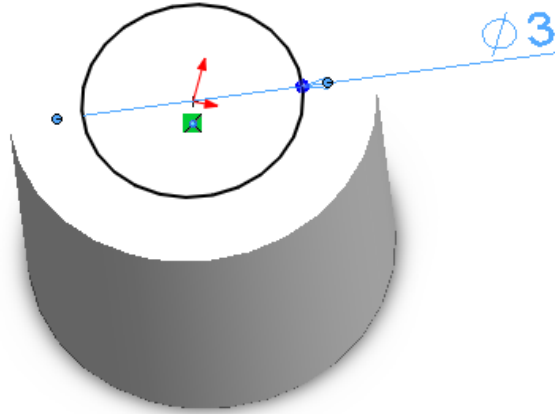
*Figura 30: Torre de Cimentación*

Para la construcción de la torre se han realizado cuatro croquis. El primero es el correspondiente a la base de la torre, la cual está hecha por un cilindro de 5 metros de diámetro y 4 metros de altura con un redondeo en la parte donde se une con la parte de la torre de menor diámetro.

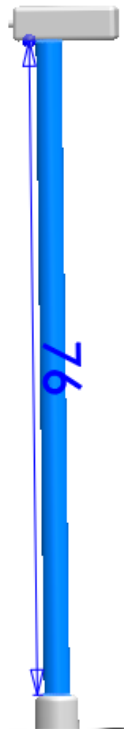


*Figura 31: Base de la torre de cimentación*

El segundo croquis es el que da forma a la torre y se encuentra a 4 metros de altura. Este croquis está compuesto por una circunferencia de 3 metros de diámetro. A partir de este croquis se ha creado una extrusión para llegar a la altura a la que se encuentra la góndola, la cual se ha colocado a una altura de 80 metros, por lo que la extrusión es de 76 metros.



*Figura 32: Croquis de la base de la torre*



*Figura 33: Altura desde la base hasta la góndola*

## 8.2. DISEÑO DE LA GÓNDOLA

La góndola está formada por un rectángulo de 12 metros de largo por 4 metros de ancho y 4 metros de alto en donde sus aristas han sido redondeadas. La góndola no dispone de más detalles y es un conjunto sólido ya que no la he considerado como un elemento de relevancia para el objetivo que tiene el trabajo.

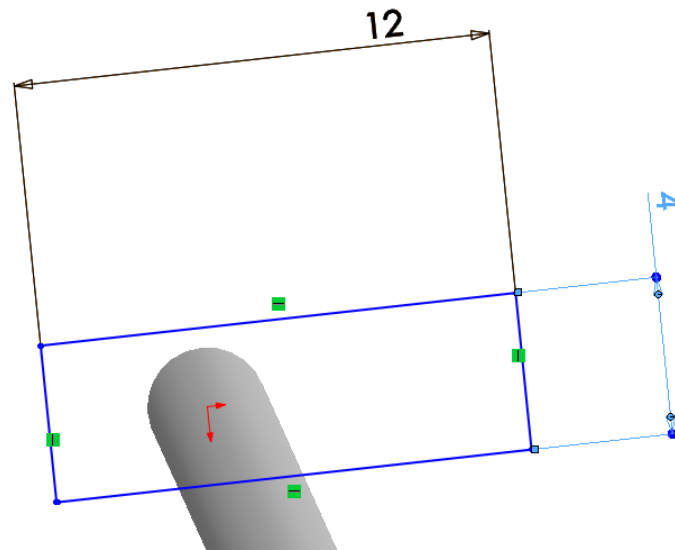


Figura 34: Medidas de la góndola

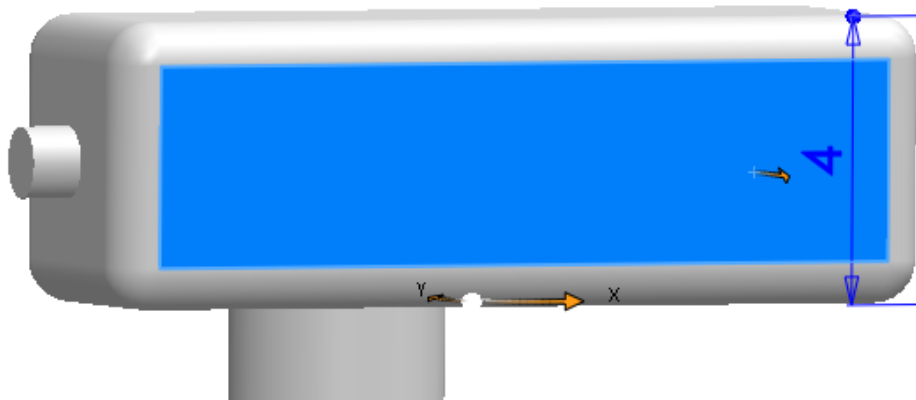
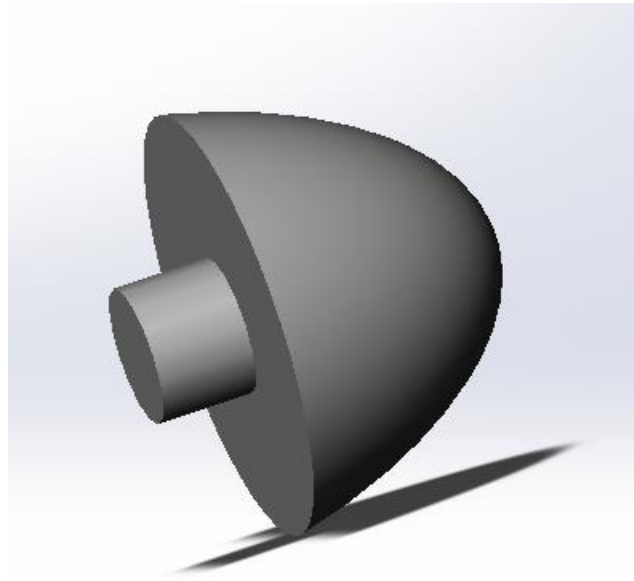


Figura 35: Altura de la góndola

La góndola dispone, en un extremo, del eje principal donde se va a alojar el buje del aerogenerador y lo que permitirá que en su movimiento de rotación se genere la energía. El eje tiene un diámetro de 1 metro y de 70 centímetros de longitud.

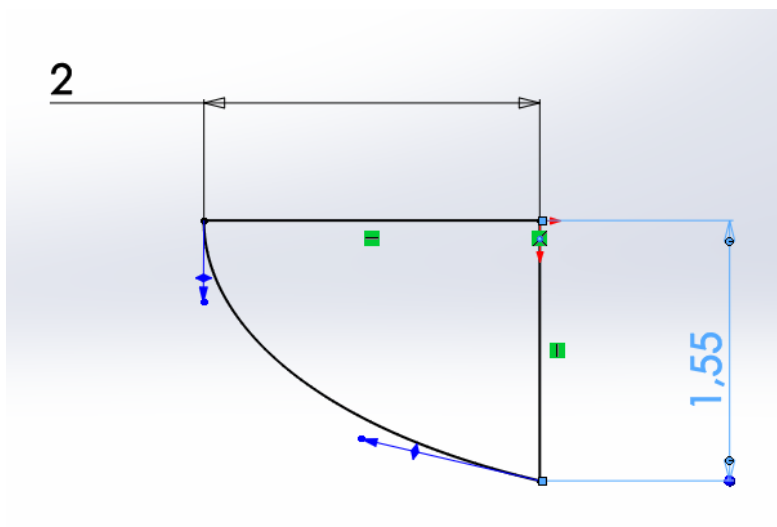
### 8.3. DISEÑO DE LA NARIZ

La nariz del aerogenerador tiene una forma de punta y va colocada en el buje, ya que su única función es la de dirigir el flujo hacia los respiraderos de la góndola y evitar que se formen torbellinos en la punta del aerogenerador que entorpezcan el funcionamiento normal de la turbina eólica.



*Figura 36: Nariz del aerogenerador*

El croquis de la nariz del aerogenerador está formado por dos líneas perpendiculares, una de 2 metros de longitud y la otra de 1,55 metros de longitud, unidas por una línea curva.



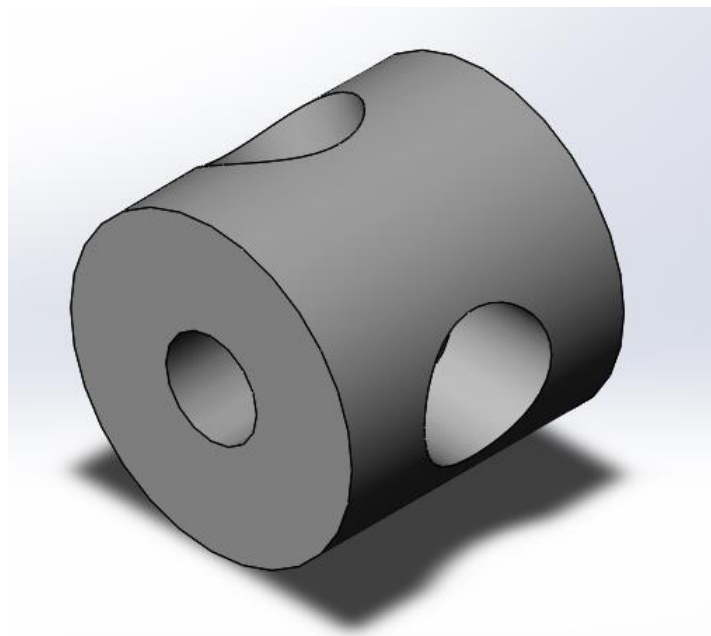
*Figura 37: Croquis de la nariz del aerogenerador*



#### 8.4. DISEÑO DEL BUJE

El buje tiene la misión de sostener los álabes de la turbina y de hacer girar el eje del aerogenerador cuando el viento mueve los álabes. Por lo tanto, es de las partes más importantes del aerogenerador ya que transmite el movimiento de los álabes al eje principal.

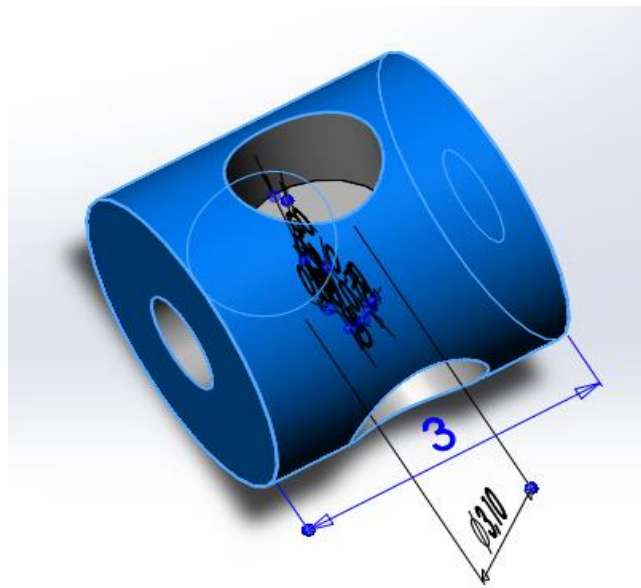
El diseño del buje está formado por un cilindro el cual dispone en su superficie lateral exterior de tres orificios en donde sus ejes se encuentran separados por un ángulo de  $120^\circ$ .



*Figura 38: Buje del aerogenerador*

En la figura 38 se puede observar la forma del buje. El diámetro exterior mide 3,10 metros y el diámetro de los orificios donde los ejes de los álabes van anclados miden 1,40 metros.

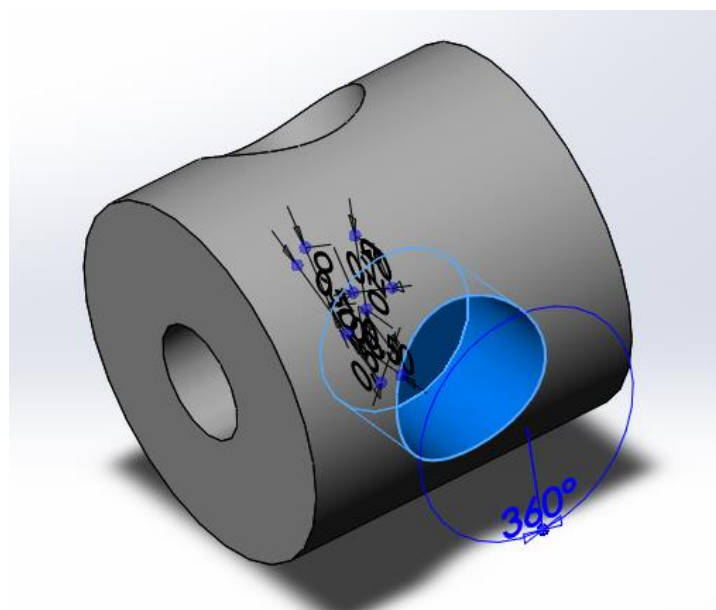
Para crear la forma del buje, se ha dibujado en el croquis el plano medio del buje, indicando en ese croquis las medidas de los orificios donde se alojarán las raíces de las palas del aerogenerador. Después de tener hecho el croquis de la parte central del buje, se hace la extrusión desde el croquis perpendicularmente hacia ambos lados hasta llegar a una longitud total de 3 metros.



*Figura 39: Proceso de extrusión del buje del aerogenerador*

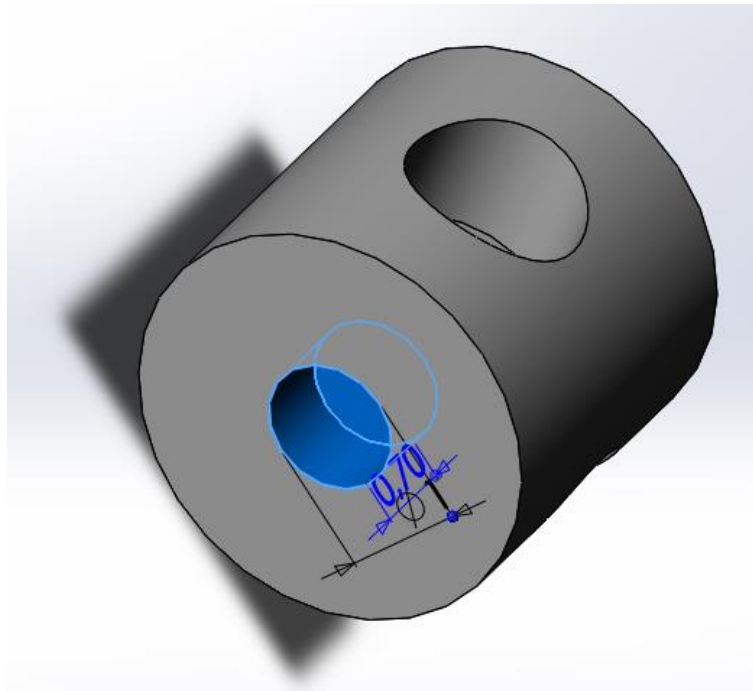
Una vez hecha la extrusión de la longitud del buje del aerogenerador, se pasa a realizar los vaciados por revolución de los orificios que alojarán a los ejes de los álabes y de los dos orificios situados en las caras planas del buje, uno donde se alojará la nariz del aerogenerador y otro, donde se conectará al eje principal.

En la figura 40, en donde se indica la operación realizada para conseguir los orificios de los álabes, se puede observar que el ángulo de vaciado es  $360^\circ$  y así, eligiendo las generatrices usadas en el croquis del buje como eje de revolución y poniendo  $360^\circ$  de revolución, se consiguen los orificios para los ejes de los álabes.



*Figura 40: Operación de vaciado para los orificios de los álabes*

Para la realización de los orificios de las caras planas del buje, simplemente se ha dibujado un croquis en dichas caras planas y señalando la opción de vaciado por extrusión se consiguen dichos orificios. Los dos croquis tienen las mismas medidas: el diámetro de la circunferencia es 1 metro y la profundidad de extrusión es de 0,70 metros.



*Figura 41: Dimensiones de los vaciados en las caras planas del buje del aerogenerador*

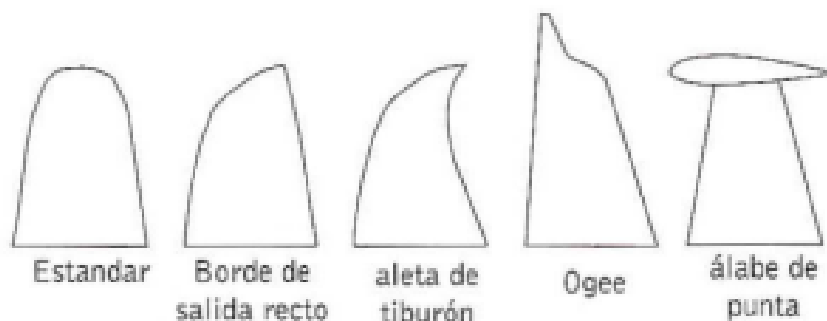
#### 8.4. DISEÑO DE LOS ÁLABES

El álabe del aerogenerador ha sido la parte más difícil de realizar a comparación con las demás partes de la turbina eólica. Sin embargo, tiene sentido que su construcción sea la que más trabajo tiene ya que es la parte que más repercusión tiene en el resultado del proyecto.

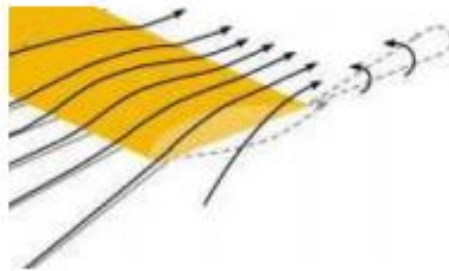
Las palas de los aerogeneradores disponen de numerosas partes. Entre ellas se encuentran:

- La zona de la raíz, la cual es la zona más cercana al rotor.
- La zona de transición, que es la zona que une la parte aerodinámica con la zona de la raíz y la cual no dispone de un perfil aerodinámico óptimo, pero si tiene que estar lo más suavizada posible para evitar ruidos.

- La zona aerodinámica es la zona más importante de la pala y está formada por diferentes perfiles aerodinámicos, con diferentes valores de cuerda y ángulos de ataque.
- La zona de la punta de la pala es una zona bastante crítica ya que pueden existir problemas de extracción de potencia en esta zona y por ello, importa mucho su fabricación. El diseño de esta parte intenta evitar la filtración de flujo de aire desde el intradós (zona de mayor presión) al extradós (zona de menor presión) ya que se producen pérdidas aerodinámicas y torbellinos en la punta que producen ruidos.



*Figura 42: Ejemplos de punta de pala*



*Figura 43: Torbellino en la punta de la pala*

Los álabes tienen numerosas zonas en su perfil aerodinámico. Además, existen numerosas definiciones para los perfiles aerodinámicos, como por ejemplo, la sección de un ala o álabe generado por un plano perpendicular a las generatrices o una curva envolvente de una familia de circunferencias de radio variable cuyos centros se encuentran colocados sobre un arco de curva denominado línea media o esqueleto o por último, como un contorno cerrado alargado en la dirección del flujo que delimita un dominio de espesor variable en donde el borde de ataque se conoce como redondeado y el borde de salida es de espesor reducido. Por tanto, en cuanto varíe

alguna parte del álabe, puede cambiar el comportamiento de la pala cuando el aire pasa por su superficie. Las partes de un perfil aerodinámico son las siguientes: [9]

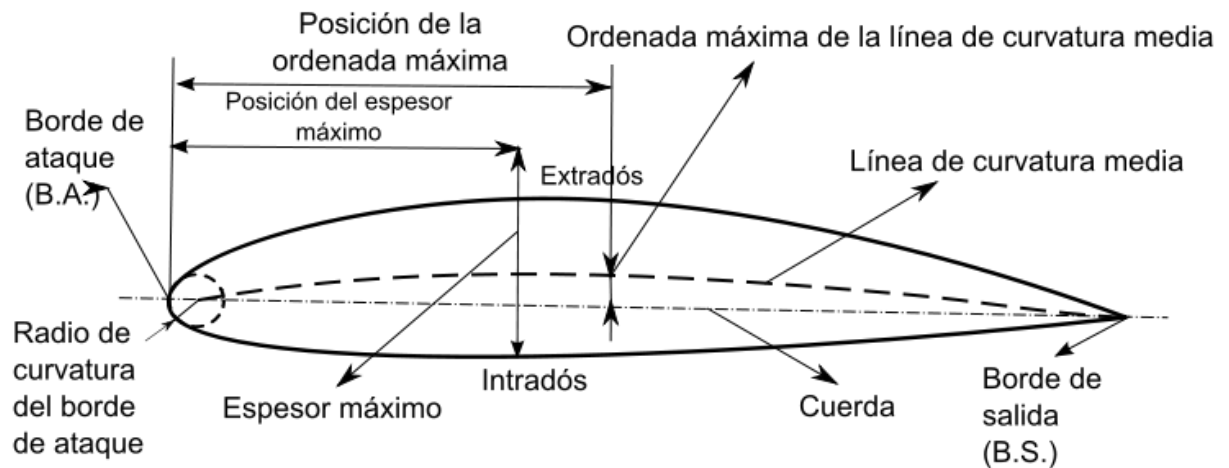
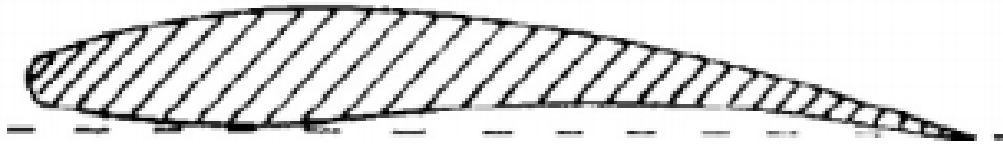


Figura 44: Partes de un álabe

- **Cuerda (c):** Es la línea que une los extremos del álabe, desde el borde de ataque hasta el borde de salida.
- Posición del máximo espesor
- **Espesor relativo ( $d/c$ ):** Se mide en porcentaje y representa la relación entre el espesor máximo perpendicular y la línea media del perfil respecto a la cuerda.
- **Línea de curvatura media:** Representa la curvatura del perfil.
- **Máxima curvatura ( $f/c$ ):** Se mide en porcentaje y representa la relación entre la posición de la ordenada máxima, flecha máxima  $f$ , con respecto a la cuerda.
- Posición de la máxima curvatura.
- Radio de la nariz,  $r_N$ .
- **Intradós:** Cara de presión.
- **Extradós:** Cara de succión.
- **Borde de ataque:** Zona anterior del perfil.
- **Borde de salida:** Zona posterior del perfil

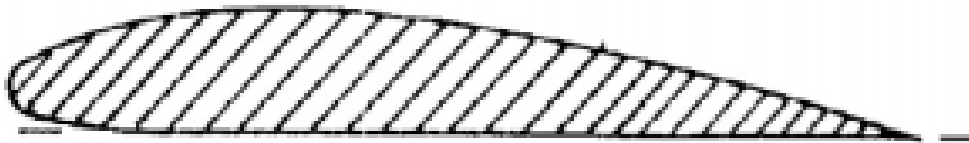
Otra clasificación que tienen los perfiles aerodinámicos es de acuerdo a la variación producida en las partes anteriores mencionadas y por ello, la clasificación es la siguiente:

- Perfil Cóncavo-Convexo: en este perfil el intradós está hacia adentro del perfil. La cuerda en este perfil es la distancia en línea recta entre el borde de ataque y el borde de fuga pasando por fuera de la parte del contorno del perfil. Este perfil se utiliza en aeronaves de velocidad y planeadores.



*Figura 45: Perfil Cóncavo-Convexo*

- Perfil plano-convexo: la parte del intradós es recta mientras que la del extradós es curva. La cuerda en este perfil es la distancia entre el borde de ataque y el borde de salida a lo largo del intradós.



*Figura 46: Perfil Plano-Convexo*

- Perfil biconvexo Asimétrico: en este perfil la curvatura del extradós es mayor que la del intradós. La cuerda va desde el centro del borde de ataque hasta el extremo del borde de salida.



*Figura 47: Perfil Biconvexo asimétrico*

- Perfil laminar: es un perfil biconvexo, simétrico o asimétrico, de poco espesor y diseñado para mantener la capa límite lo más reducida posible y minimizando el arrastre.



Figura 48: Perfil laminar

- Perfil supercrítico: este perfil tiene casi recta la parte del extradós, reduciendo la aceleración en esa zona, pero manteniendo el espesor máximo del 50% de la cuerda, lo que retrasa la curvatura del intradós y retardando la formación de las ondas de choque al borde de fuga, reduciendo así el arrastre por compresibilidad. Es usado en vuelos cerca de la velocidad del sonido.



Figura 49: Perfil supercrítico

Para la realización de las palas del aerogenerador he escogido la nomenclatura de perfiles “NACA” (*National Advisory Committee of Aeronautics*). Esta nomenclatura es capaz de aunar en cuatro o cinco dígitos las características anteriores y así, poder reconocer rápidamente cómo es la forma de un perfil. El primer número indica la máxima flecha de la línea media en % con respecto a la cuerda, ( $f/c$ ), la segunda indica la distancia de esta magnitud con respecto al borde de ataque,  $xf$ , y la última cifra indican el espesor máximo relativo a la cuerda ( $d/c$ ). [2]

He escogido para el perfil del álabe un perfil NACA 2415, el cual indica que tiene un 2% de máxima flecha con relación a la cuerda, que se encuentra situada al 40% del borde de ataque y que dispone de un 15% de espesor máximo en relación con la cuerda. Este perfil ha sido obtenido por un generador de perfiles NACA, en el cual es posible indicar cuál es el tipo de perfil que se quiere obtener y cuántos puntos se quieren para formar el perfil. De esta manera, se puede exportar fácilmente un archivo con dichos puntos dados por el generador de perfiles NACA e introducirlo en el programa de diseño *Solid Works* para crear un croquis.



## NACA 4 digit airfoil generator (NACA 2415 AIRFOIL)

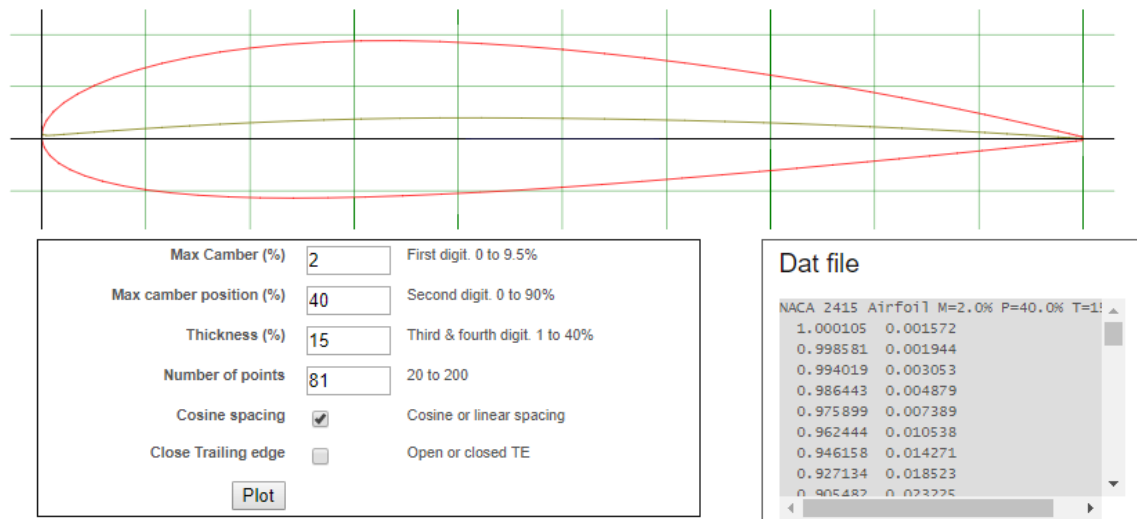


Figura 50: Perfil del alabe NACA 2415

Como se puede observar en la imagen anterior, a la derecha se encuentran los puntos que forman el perfil requerido. Estos puntos son copiados a un bloc de notas o a un libro de Excel para ser luego importados. Así mismo, en la imagen siguiente se encuentra el perfil del alabe dibujado mediante el comando “Curva” y los puntos que forman dicho perfil.

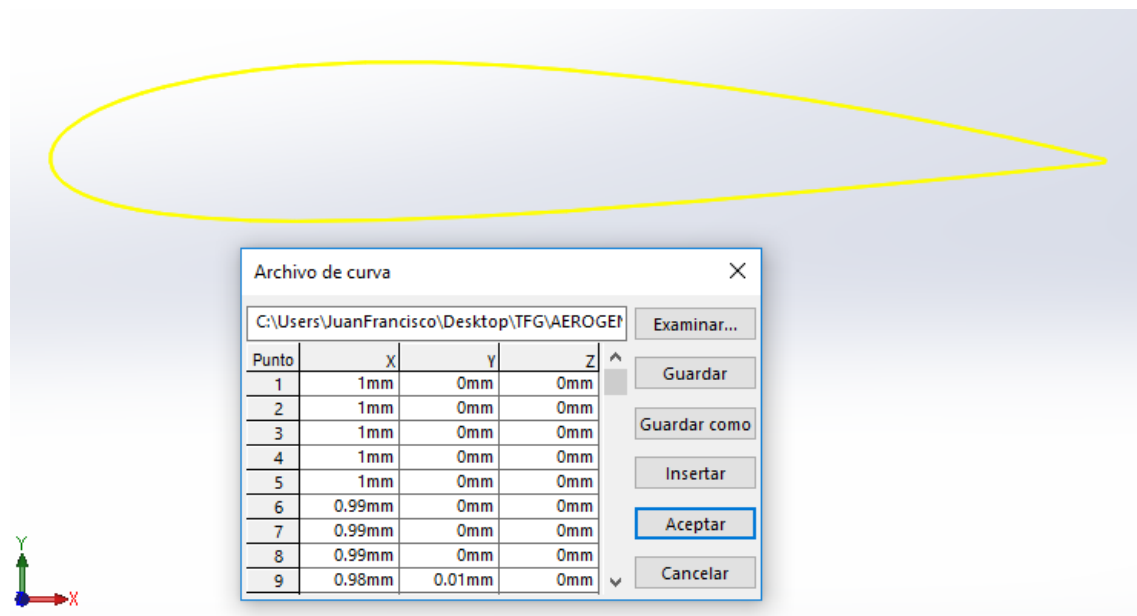
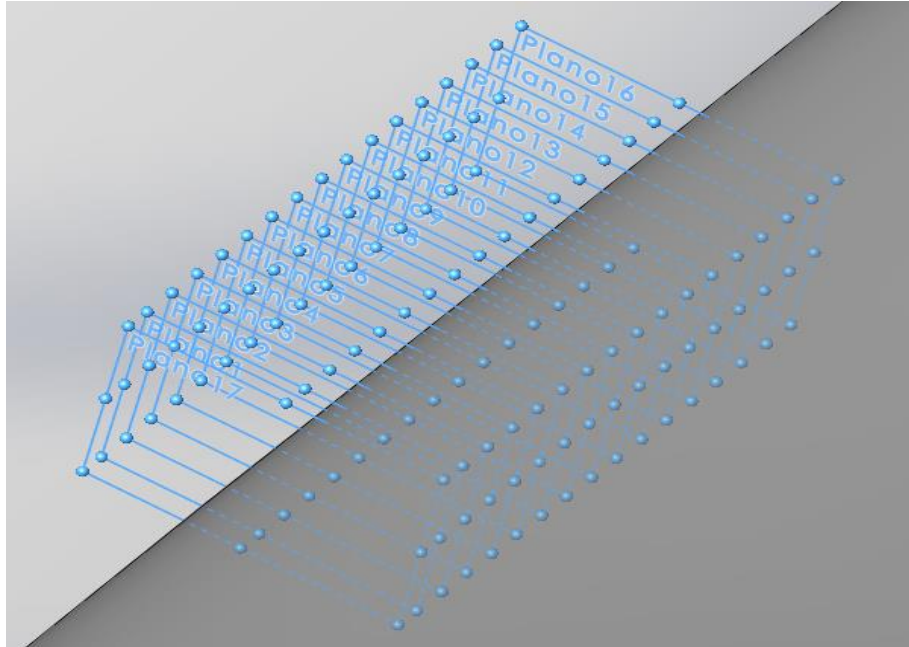


Figura 51: Perfil importado al Solid Works y sus puntos

Una vez que se tiene hecha la curva del perfil de la pala, se hacen planos paralelos a la curva dibujada para conseguir que todo el alabe disponga del mismo perfil. En este

caso se han realizado 16 planos separados entre ellos por una distancia de 20 milímetros.



*Figura 52: Imagen de los 16 planos paralelos*

Estos 16 planos paralelos sirven para poder copiar la curva del perfil del alabe que se ha creado al principio en cada uno de los planos. En cada plano, el perfil copiado está escalado con diferentes valores, mayores en los planos cercanos a la raíz de la pala y menores en los planos cercanos a la punta y así conseguir la forma característica de una pala de un aerogenerador.

También, a la vez que se ha ido escalando la curva en cada plano, se ha introducido un valor de giro para poder conseguir cierta torsión en toda la longitud de la pala del aerogenerador.

En la siguiente imagen, se puede observar el resultado del proceso comentado anteriormente. Hay que decir que los valores introducidos para la consecución de la pala del aerogenerador no obedecen a valores estudiados que puedan desembocar en un mayor valor de potencia conseguida o un mayor rendimiento, ya que no he tenido tiempo ni recursos para realizar un estudio de tal calibre. Su construcción es resultado de la visualización de numerosos tutoriales en donde se explica cómo se construye una pala de un aerogenerador, aunque quizá no sea la manera más profesional, pero es un resultado efectivo para el objetivo de mi proyecto.

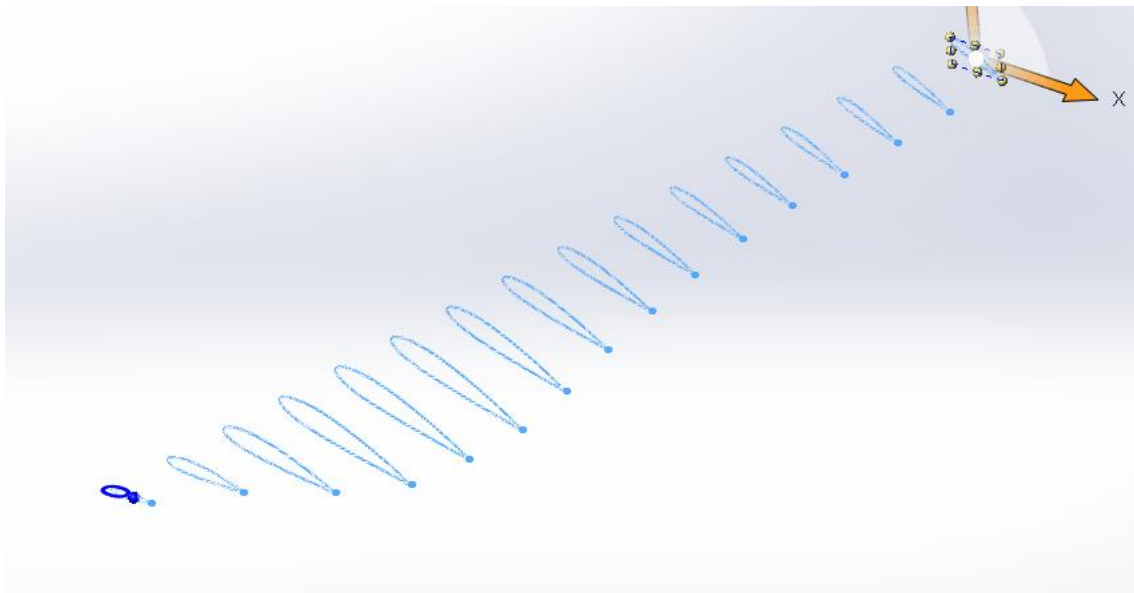


Figura 53: Pala del aerogenerador formada por los distintos perfiles escalados

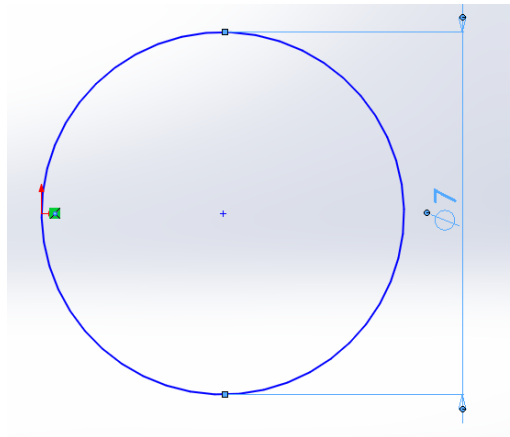
Los valores de las escalas y de los giros aplicados a la curva del álabe copiados en los distintos planos se adjuntan en la siguiente tabla:

Plano	Escala	Giro (º)
1	13	0
2	25	-4
3	35	-11
4	44	-15
5	45	-16
6	44	-17
7	40	-17
8	35	-16
9	31	-16
10	27	-17
11	24	-17
12	22	-18
13	21	-19
14	20	-20
15	19	-21
16	18	-22

Tabla 2: Datos de los perfiles de los álabes

El siguiente paso en la construcción en 3D de la pala del aerogenerador es crear un plano a 15 milímetros del plano 1 pero en la dirección contraria a los demás, es decir, un plano más cercano que los demás a la raíz de la pala. Este plano sirve para dibujar en él el croquis del eje de la pala del aerogenerador, el cual se introducirá en el orificio

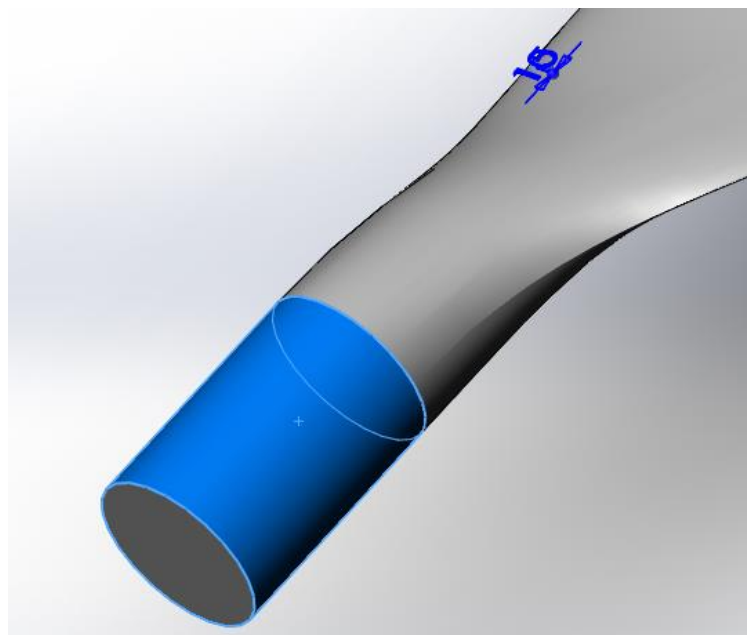
del buje y servirá para que se transmita el movimiento al eje del aerogenerador. Por ello, el croquis del eje tiene una medida de diámetro de 7 milímetros, pero eso es debido a que todavía no está escalada la pala entera a su medida final.



*Figura 54: Croquis de la raíz del aerogenerador*

Este croquis, además de servir para la creación de la raíz del aerogenerador que se introducirá en el buje, tiene la misión de facilitar la operación de barrido para la elaboración de la pala del aerogenerador.

El siguiente paso es utilizar el comando de extrusión para crear la prolongación a partir del croquis anterior. Esta extrusión, al igual que el croquis dibujado anteriormente, no tiene la medida real ya que no está escalado y, por tanto, la longitud de extrusión es solo de 10 milímetros.



*Figura 55: Proceso de extrusión de la raíz de la pala del aerogenerador*

Como la pala del aerogenerador va a ser creada a través de superficies, lo siguiente a hacer es utilizar el comando de recubrir por superficies. Gracias a este comando es posible seleccionar numerosos perfiles creados, como los creados anteriormente los cuales son copias del perfil del álabe en diferentes planos paralelos y el último croquis creado para la raíz de la pala, y crear una superficie que los cubra a todos y forme un cuerpo, a primera vista, sólido.

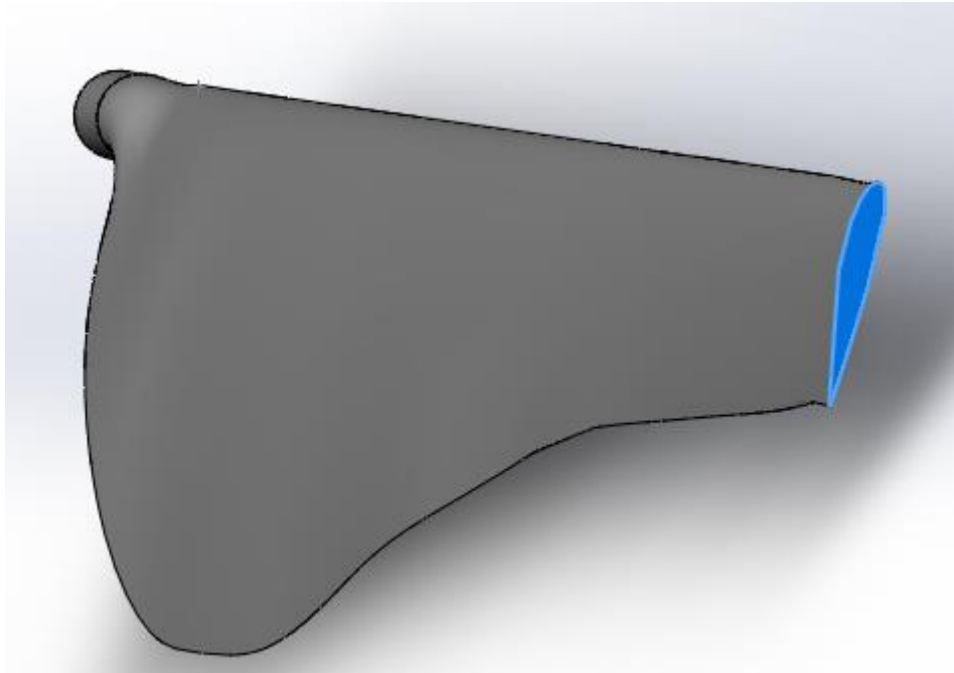


*Figura 56: Pala del aerogenerador creada gracias al comando "Recubrir"*

Aunque en la imagen es difícil percibirlo, cerca de la raíz se encuentran los planos que crean toda la pala y el croquis a partir del cual se crea la extrusión de la raíz de la pala. La parte sombreada en azul es el resultado del recubrimiento a los perfiles creados junto con el croquis de la raíz. Por lo tanto, el recubrimiento sin escalar es diminuto en la imagen, pero al escalarlo da como resultado la pala del aerogenerador.

Viendo la imagen arriba adjunta parece que la pala del aerogenerador es un sólido completamente cerrado, pero no es así. El comando de recubrimiento de superficies solamente crea una capa que cubre todos los perfiles creados, pero no cierra

completamente la estructura creada. Es por ello, que el siguiente paso a dar es rellenar las partes que faltan para que la pala del aerogenerador sea una estructura rígida y no tenga ninguna apertura por ninguno de sus extremos. Con el comando rellenar, se puede seleccionar la parte de la pala que falta y crear la superficie cerrada.



*Figura 57: Parte de la pala del aerogenerador en donde se aplica el relleno*

La parte sombreada de azul de la imagen representa la sección de la pala en donde faltaba material y por ello es rellenada. Esta parte corresponde al último perfil creado, al plano 16 y es la punta de la pala.

Las últimas operaciones a realizar en el programa de diseño *Solid Works* son las operaciones de coser superficies y escalar. La operación de coser es necesaria para crear definitivamente un conjunto sólido con todas las superficies que lo forman y que no haya ningún problema de lectura cuando el archivo CAD se importe al programa de análisis.

La operación de escalado sirve para darle a la pala del aerogenerador las medidas que queremos que tenga finalmente. Esto es debido a que la pala del aerogenerador ha sido creada con medidas de la magnitud de los milímetros ya que los puntos dados del generador de perfiles NACA estaban en milímetros. Es por ello que he creado todos los planos y las extrusiones en milímetros ya que así era más fácil que ir convirtiéndolo, mientras lo hacía, a metros. El valor del escalado es el siguiente:

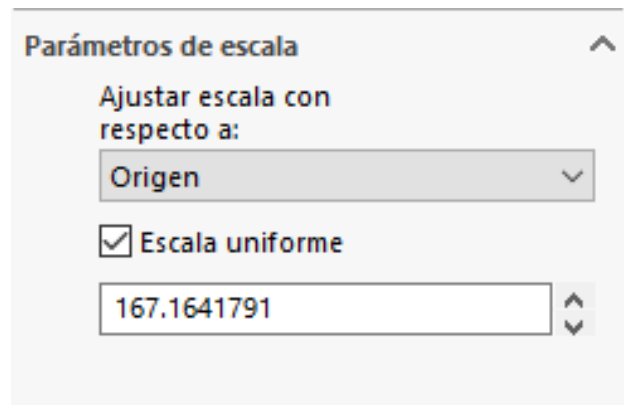


Figura 58: Valor del escalado para la pala del aerogenerador

## 8.5. ENSAMBLAJE DEL AEROGENERADOR

El último paso que hay que realizar en el diseño del aerogenerador y sus piezas es el ensamblaje del conjunto de las piezas que los forman: la torre, la nariz, el buje y los álabes. Para ello, se hace uso de la función que poseen los programas de diseño CAD, en nuestro caso, el *Solid Works*. Esta función es la de ensamblaje y permite unir todas las piezas que se han construido en los apartados anteriores y así poder luego importar el conjunto creado al programa de análisis computacional para observar los resultados de la simulación.



Figura 59: Ensamblaje del aerogenerador





En este apartado del programa *Solid Works*, se van importando las piezas que se quieran unir, y no solo una vez, si no que se pueden importar tantas veces como piezas iguales tenga el conjunto final. Además, cuando se van a unir las distintas piezas entre sí, hay que imponer la relación que van a tener las piezas, por lo que el proceso de unión es bastante fácil de realizar.

## 9 SIMULACIÓN CFD

---

### 9.1. INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La dinámica de fluidos computacional, más conocido como CFD (Computational Fluid Dynamics, siglas en inglés), es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el comportamiento de fluidos. Para el análisis de fluidos hay que hacer uso de los principios fundamentales de la conservación de la masa, el momento y la energía. Así mismo, utilizando esta técnica y haciendo uso de un ordenador que permita soportar una gran cantidad de datos, como son números y fórmulas utilizadas, se pueden obtener resultados bastante fiables del comportamiento de dicho fluido.

#### 9.1.1. Procedimiento de la dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional hace uso de la aproximación de variables continuas utilizando un número finito de puntos. Este proceso se llama discretización y en resumen lo que el programa de análisis CFD hace es ir resolviendo complejas ecuaciones integrales. Para conseguir los resultados de estas ecuaciones complejas resuelve ecuaciones aproximadas, más simples, y de tipo algebraico. Al imponerle un número elevado de iteraciones y valor muy pequeño de error, nos aseguramos de que los resultados que se obtienen son fiables y precisos.

#### 9.1.2. Pasos en una simulación CFD

- **Preparación de la pieza a simular**

Antes de introducir la pieza o estructura que hemos creado en el proceso de simulación para conseguir los resultados es necesario preparar la misma. Esta etapa consiste en crear la malla que cubrirá a la pieza, que tipo de mallado tendrá, la imposición de las condiciones de contorno y la elección de las variables, las cuales merecerán especial cuidado ya que serán los valores que nos interesan obtener.

En esta etapa, hay que prestar mucha atención ya que los resultados dependerán de lo bien definido que esté el proceso. También en esta etapa es donde hay que elegir qué se quiere analizar y qué resultados obtener, a lo que también hay que añadir la capacidad computacional del ordenador u ordenadores utilizados.



- **Solución de las ecuaciones**

Esta etapa es donde nosotros no tenemos casi presencia ya que es aquí donde se lleva a cabo la simulación CFD y las iteraciones de las ecuaciones para llegar a las soluciones requeridas

- **Análisis de los resultados**

Los resultados de la simulación anterior, en donde se resuelven las ecuaciones que gobiernan el problema, se presentan en esta etapa. Es aquí donde las distintas variables del problema como son la densidad, la presión, la velocidad del flujo o la viscosidad toman valores para los distintos puntos que nosotros hemos impuesto al mallado de la estructura. En esta etapa es muy importante saber interpretar correctamente los distintos datos que el programa nos proporciona, siendo estos datos entregados en escalas o gráficos de colores.

### **9.1.3. Aplicaciones en la industria del CFD**

La dinámica computacional de fluidos tiene numerosas aplicaciones en la industria. Además, es una herramienta muy útil porque permite conocer las consecuencias de una experiencia en concreto y si el resultado es el esperado para lo que se ha propuesto. También, es capaz de ahorrar mucho tiempo y dinero, ya que nos evitamos tener que construir de verdad lo que queremos probar. Algunas aplicaciones son las siguientes:

- Aerodinámica – aviones y automóviles
- Hidrodinámica de embarcaciones
- Motores
- Turbomáquinas – bombas y turbinas
- Transferencia de calor – sistemas de calentamiento o enfriamiento
- Combustión
- Ingeniería de procesos – mezclas y reacciones químicas
- Cargas de viento – fuerzas y respuesta dinámica de estructuras
- Riesgos de fuego y explosiones
- Ingeniería medioambiental – transporte de efluentes líquidos y gaseosos



- Ingeniería costera – cargas en estructuras costeras y “offshore”
- Hidráulica – redes de tuberías, depósitos, canales, presas...
- Oceanografía – corrientes oceánicas y maremotos
- Meteorología – predicción numérica del tiempo
- Ingeniería biomédica – flujo de la sangre en el corazón, venas y arterias
- Electrónica – refrigeración de circuitos

## 9.2. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

### 9.2.1. Introducción

La discretización espacial del dominio es lo primero que hay que realizar cuando se hace uso de la dinámica de fluidos computacional para luego poder crear sobre esa discretización espacial, la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos. Existen numerosos métodos de discretización espacial del dominio, pero los más importantes se pueden agrupar en tres categorías: elementos finitos, volúmenes finitos y diferencias finitas.

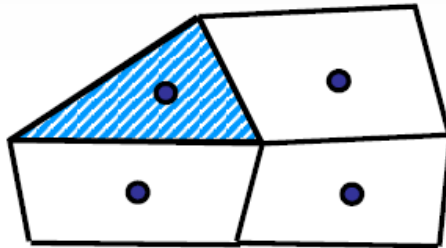
Todos los métodos nombrados conllevan que se tenga que realizar previamente una discretización espacial para pasar luego a la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Esta discretización espacial es el mallado que hay que aplicar a lo que se quiera analizar y se pueden diferenciar dos tipos de mallado:

- **Mallados estructurados:** en este mallado cada punto de la malla está identificados por los índices  $i, j$  y  $k$ , en coordenadas cartesianas. La forma de las mallas que se forman son cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.
- **Mallados no estructurados:** en este mallado no hay relación entre los nodos y los puntos y por ello, no se pueden identificar por ningún índice. Las formas de las mallas, en este caso, son cuadriláteros y triángulos en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D.

La discretización espacial a usar dependerá del tipo de discretización de las ecuaciones empleado, así como la estructura interna de los datos empleados para resolver el flujo. Por ejemplo, el método de las diferencias finitas, que discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial, requiere una malla de estructura de puntos en donde se guardan las variables de flujo. Sin embargo, en el método de los volúmenes finitos, es necesario definir puntos de control en cada volumen generado. Por ello, dependiendo del método utilizado y de los vértices donde se guardan las

variables, se pueden definir en el centro de los elementos (*cell centred*) o en los vértices de las celdas (*cell vertex*).

Cell-Centred



Vertex-Centred

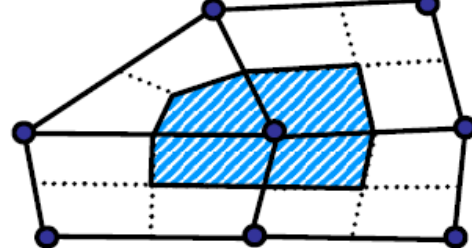


Figura 60: Ilustración de las mallas con puntos en el centro y puntos en los vértices

### 9.2.2. Mallas estructuradas

Este tipo de mallas tiene la principal ventaja en la ordenación de los elementos en la memoria ya que, al estar tan ordenado, el acceso a los datos es muy rápido y sencillo, habiendo solo que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Estas mallas pueden presentarse con líneas cartesianas o curvilíneas. Si las líneas son cartesianas quiere decir que todas las líneas que forman las celdas son paralelas al sistema de coordenadas, mientras que, si las líneas son curvilíneas, las líneas tienden a deformarse para adaptarse a la forma que tiene la estructura que se va a analizar.

Otra clasificación de este tipo de mallas es si las mallas son ortogonales o no ortogonales. Las mallas ortogonales se caracterizan porque todas las líneas que forman la malla se cortan entre sí por ángulos de  $90^\circ$ . Sin embargo, con estas mallas ortogonales, los flujos pueden considerarse axisimétricos y por ello, se expresan las ecuaciones en coordenadas polares  $(r, \vartheta)$ , en vez de en coordenadas cartesianas  $(x, y)$ .

Por último, existe otro método de las mallas estructuradas llamado *técnica de la quimera*, que consiste en crear mallas independientes unas de otras por todo el dominio y luego se unen las mallas, solapándose los elementos. Lo más importante es que la transferencia de las cantidades entre las mallas y dónde se ha producido el solape. La ventaja de este método es que se pueden crear mallas para problemas concretos sin tener que crear mallas particulares, pero la desventaja es que no se mantienen las propiedades de las ecuaciones que gobiernan el fluido en el punto donde las mallas se solapan.

### 9.2.3. Mallas no estructuradas

La principal ventaja de las mallas no estructuradas es que son capaces de ajustarse mucho mejor a geometrías complejas en comparación con las mallas estructuradas. Esto sucede debido a que los triángulos (2D) y los tetraedros (3D) se generan automáticamente para ajustarse a la geometría, independientemente de la dificultad de la misma. Además, el tiempo que se necesita para crear en una geometría un mallado no estructurado es mucho menor que si hubiera que hacer uno estructurado.

Otra ventaja es que la solución obtenida de la simulación va a depender del refinamiento al que sometamos a la malla. Por ello, siempre es bueno ajustar ciertos parámetros para conseguir una buena calidad de la malla antes de empezar con la simulación.

Sin embargo, la principal desventaja de los mallados no estructurados es que ocupan más memoria que los mallados estructurados.

## 9.3. DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES

- **Método de las diferencias finitas**

El primer método aplicado para obtener la solución numérica de unas ecuaciones diferenciales fue el método de las diferencias finitas. La primera persona en utilizarlo fue Euler, posiblemente en 1768.

Este método emplea el desarrollo en series de Taylor para la discretización de las derivadas de las variables de flujo. Por ejemplo, si se quiere calcular la derivada de una función escalar  $U(x)$  evaluada en un punto  $x_0$ , tenemos:

$$U(x_0 + \Delta x) = U(x_0) + \Delta x \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x_0} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \Big|_{x_0} + \dots \quad (\text{Ec.23})$$

viendo esto, se puede decir que la primera derivada de  $U(x)$  puede aproximarse por:

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x_0} = \frac{U(x_0 + \Delta x) - U(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{Ec.24})$$

Esta aproximación es de primer orden, porque el truncamiento del error es proporcional al término de mayor orden del resto de la serie.

Este mismo procedimiento se puede emplear para obtener aproximaciones más exactas del método de las diferencias finitas, sin más que aproximar con más términos de la serie de Taylor que se obtiene.



La principal ventaja del método de las diferencias finitas es su simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método sin más que aumentar el orden de aproximación de las derivadas.

Por otro lado, este método requiere una malla estructurada y por ello, el campo de aplicación se ve reducido a ciertos problemas, como, por ejemplo, geometrías sencillas. Otro problema es que este método no funciona con coordenadas curvilíneas, y hay transformar las ecuaciones de Navier-Stokes a coordenadas cartesianas para poder resolver el problema. Este método no se utiliza mucho para aplicaciones industriales y sí para simulación de la turbulencia.

- **Método de los volúmenes finitos**

Este método emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral. Fue utilizado por primera vez por McDonald para la simulación de un problema en 2D no viscoso.

Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial. La integral de superficie que aparece en el término de la derecha de la ecuación de Navier-Stokes completa, en su forma integral, es aproximada por la suma de los flujos que atraviesan cada una de las caras del poliedro.

La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de las diferencias finitas. Comparado con el método de las diferencias finitas, este método es mucho más flexible, pudiendo ser utilizado en mallas estructuradas y no estructuradas. Por ello, el método de los volúmenes finitos es el más empleado para la resolución de flujos con geometrías complejas.

El método de los volúmenes finitos se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y la energía. Esto nos lleva a otra característica de este método que es la obtención de soluciones “débiles” de las ecuaciones. Sin embargo, en este caso, en las ecuaciones de Euler, es necesario añadir una ecuación más llamada *ecuación de la entropía*. Esta ecuación es necesaria porque no existe una única solución “débil”.

Es interesante resaltar que, bajo unas ciertas condiciones, el método de los volúmenes finitos es equivalente al método de las diferencias finitas. Por lo tanto, este método es el más utilizado y el más popular.





- **Método de los elementos finitos**

Este método fue introducido por primera vez por Tuner en 1956 para el análisis estructural y tuvieron que pasar diez años para que empezara su implementación en la resolución de las ecuaciones de campo en medios continuos. Sin embargo, no fue hasta la década de los 90 cuando este método se hizo más popular ya que se empezó a utilizar para la resolución de las ecuaciones de Euler y de Navier-Stokes.

El método de los elementos finitos utiliza la fragmentación del dominio en elementos triangulares para 2 dimensiones y tetraédricos para 3 dimensiones, lo que da lugar a una malla no estructurada. Dependiendo del tipo del elemento y de la precisión que se requiera, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos. El número total de nodos multiplicado por el número de variables del problema es el número de grados de libertad del problema.

Es necesario también definir las llamadas *funciones de forma* que representan las variaciones de la solución en el interior de los elementos. En la práctica, solamente se emplean funciones de forma lineales, que emplean únicamente los nodos pertenecientes a la malla. Las funciones de forma son distribuciones lineales de valor cero fuera del elemento correspondiente a la función. Esto da lugar, a una aproximación de segundo orden en la representación de los resultados.

Este método es muy utilizado ya que hace uso de mallas estructuradas, ideales para la resolución de problemas con geometrías complejas. También es usado para problemas donde hay presencia de fluidos no newtonianos. El método de los elementos finitos tiene una base matemática muy rígida, particularmente en problemas elípticos y parabólicos. Sin embargo, existen casos en donde el método de los elementos finitos es matemáticamente equivalente al método de los volúmenes finitos, siendo el esfuerzo matemático mucho mayor. Esto explica por qué el método de los volúmenes finitos se ha hecho tan popular. Hay que destacar que hay ocasiones en que los dos métodos se combinan, normalmente en mallas estructuradas, como por ejemplo cuando se tratan las condiciones de contorno y la discretización de los flujos viscosos.

## 9.4. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

Las ecuaciones de Euler y de Navier-Stokes disponen de métodos de resolución, los cuales se basan en esquemas independientes para el espacio y el tiempo. A estos métodos se les llama *métodos de las líneas*. Gracias a estos métodos disponemos de gran flexibilidad al poder elegir entre diferentes niveles de aproximación para flujos convectivos y viscosos, así como la integración temporal.

Si aplicamos el *método de las líneas* a las ecuaciones en volúmenes finitos que gobiernan el problema, se debe escribir, para volumen de control, un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas en el tiempo, gobernadas por la expresión:

$$\frac{d(\Omega \vec{M} \vec{W})}{dt} = -\vec{R}(\vec{W}) \quad (\text{Ec.25})$$

en donde  $\Omega$  representa el volumen de control y  $\vec{R}$  representa la discretización espacial completa incluido el término de fuentes, el cual se conoce como residuo. Este residuo es una función no lineal de las variables  $\vec{W}$ . La variable  $\vec{M}$  representa la matriz de masas. Si hacemos uso de la discretización espacial con variables residentes en los vértices, representa el valor medio de  $\vec{W}$  en el volumen de control en los valores de los puntos asociados al nodo interior y sus vecinos. Si por el contrario, los nodos están centrados en el elemento, la matriz de masas  $\vec{M}$ , puede ser sustituida por una matriz identidad sin empeorar la precisión temporal del esquema.

Suponiendo una malla estática, tomamos un volumen  $\Omega$  y la matriz de masas se puede sacar fuera de la derivada. Por ello, podemos aproximar la derivada temporal por el siguiente esquema no lineal:

$$\frac{\Omega \vec{M}}{\Delta t} \Delta \vec{W}^n = \frac{\beta}{1+\omega} \vec{R}^{n+1} - \frac{1-\beta}{1+\omega} \vec{R}^n + \frac{\Omega \vec{M} \vec{W}}{(1+\omega)\Delta t} \Delta \vec{W}^{n-1} \quad (\text{Ec.26})$$

donde el incremento de las variables es:

$$\Delta \vec{W}^n = \vec{W}^{n+1} - \vec{W}^n \quad (\text{Ec.27})$$

y en donde los superíndices  $n$  y  $n+1$  expresan el paso del tiempo. Además,  $\Delta t$  representa el incremento de tiempo. El esquema de integración es de segundo orden en el tiempo si la condición siguiente se cumple:

$$\beta = \omega + \frac{1}{2} \quad (\text{Ec.28})$$

Si esta condición no se cumple, la precisión temporal se reduce a primer orden. Dependiendo de los valores que  $\omega$  y  $\beta$  tomen, se pueden obtener ecuaciones explícitas ( $\beta = 0$ ) o esquemas implícitos en el tiempo.

#### 9.4.1. Esquemas explícitos de integración temporal

Un esquema explícito básico se obtiene igualando  $\beta = 0$  y  $\omega = 0$ . En este caso, la derivada temporal se aproxima por una diferencia adelantada y el residuo se evalúa en el paso de tiempo actual solamente, por lo que:

$$\Delta \vec{W}^n = -\frac{\Delta t}{\Omega} \vec{R}^n \quad (\text{Ec.29})$$

Con esta ecuación se representa un esquema de una fase debido a que la solución  $\vec{W}^{n+1}$  resulta solamente de la evaluación del residuo. Además, este esquema es estable, pero solo si se combina con una discretización espacial de primer orden.

Los esquemas más populares son los de múltiples pasos (*métodos de Runge-Kutta*) donde la solución es función de varios pasos de tiempo. Es necesario utilizar una serie de coeficientes para poder obtener la influencia de cada uno de los pasos de tiempo en la solución final. Estos coeficientes se optimizan para conseguir la estabilidad y asegurar la convergencia. Asimismo, dependiendo del número de coeficientes de estado y del número de estado, se habla de una aproximación de segundo o mayor orden.

Estos métodos de múltiples pasos se pueden aplicar a cualquier esquema de discretización, ya que son fácil de implementar tanto en serie como en computadoras en paralelo. No tienen un coste excesivo y ocupan poco espacio en memoria. Sin embargo, como desventaja, el paso de tiempo máximo permisible está restringido debido a limitaciones relacionadas con la estabilidad.

#### 9.4.2. Esquemas implícitos de integración temporal

Estos esquemas implícitos de integración temporal se obtienen haciendo que  $\beta \neq 0$ . Un método muy popular para la simulación de flujos no estacionarios es el *método de los tres puntos implícitos* (hacia atrás), el cual se consigue haciendo  $\beta = 1$  y  $\omega = 1/2$ , por lo que da lugar a un método de segundo orden de aproximación en el tiempo. En este caso, el esquema más empleado es el llamado *aproximación de pasos de tiempo duales*.

Para la resolución de los problemas de flujo estacionario, un esquema con  $\omega = 0$  es el más apropiado ya que precisa de menos capacidad computacional. Para ello, si linealizamos el residuo  $\vec{R}^{n+1}$  obtenemos:

$$\left( \vec{M} \frac{\Omega}{\Delta t} + \beta \frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{W}} \right) \Delta \vec{W}^n = -\vec{R}^n \quad (\text{Ec.30})$$

en donde el término  $\frac{\partial \vec{R}}{\partial \vec{W}}$  es el Jacobiano del flujo y la expresión encerrada entre paréntesis en el término de la izquierda de la ecuación es conocido como el operador implícito.

El término  $\beta$  suele ser la unidad por lo que da lugar a una aproximación de primer orden en el tiempo. Para obtener una aproximación de segundo orden se toma un  $\beta = 1/2$ . Sin embargo, si no se emplea por el método  $\beta = 1$  es mucho más robusto.

La ventaja principal de los métodos implícitos en comparación con los explícitos es que pueden emplearse pasos de tiempo mucho más largos, sin que esto afecte a la estabilidad del proceso de integración. Además, son métodos más robustos y de mayor velocidad de convergencia en el caso de sistemas de ecuaciones rígidos; esto hace que sean los esquemas implícitos los más empleados hoy en día.

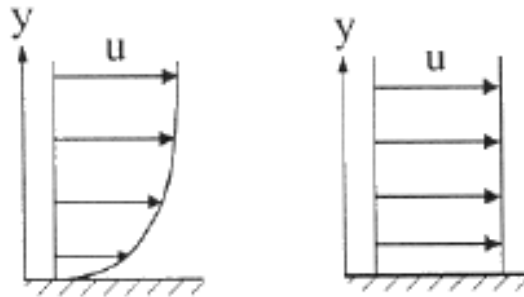
## 9.5. CONDICIONES DE CONTORNO E INICIALES

Siempre que se vaya a resolver las ecuaciones de gobierno, independiente de la metodología que se emplee, hay que imponer o especificar unas condiciones de contorno e iniciales.

Las condiciones iniciales determinan el estado de las variables fluidas en el instante  $t = 0$ , o en el primer paso del esquema de integración. Es obvio pensar que cuanto más cercana sea la condición inicial a la solución final del problema, menor será el tiempo necesario empleado para llegar a la convergencia de las ecuaciones. Gracias a esto, se reduce la posibilidad de que el problema se vuelva inestable y se llegue a la convergencia de la solución. Una práctica general en aerodinámica es imponer como valores iniciales las condiciones de flujo libre en velocidad, presión, densidad y temperatura.

En toda simulación numérica, se considera una parte del dominio fluido para la resolución de las ecuaciones. Esto da lugar a un contorno artificial donde los valores de las variables fluidas tienen que ser especificados a través de lo que se conoce como *condiciones de temperatura*. En general, las condiciones de contorno se pueden clasificar en:

- Condiciones de contorno de flujo libre: pueden ser de entrada, de salida o de entrada/salida. Las condiciones de contorno de entrada de flujo se especifican mediante las condiciones en el infinito  $(\rho_\infty, \mu_\infty, u_\infty, v_\infty, \omega_\infty, p_\infty, T_\infty)$ .
- Condiciones de contorno de pared: modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de las superficies. Se puede imponer una condición de contorno de *no deslizamiento* (velocidad nula en el punto de contacto,  $u = 0$ ), o de *tangencia* (velocidad normal a la superficie igual a cero), como se puede observar en la siguiente figura.



*Figura 61: Condición de contorno de no deslizamiento (izquierda) y de tangencia (derecha) en el contacto del flujo con una superficie*

## 9.6. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La dinámica computacional de fluidos, al igual que todas las herramientas utilizadas para la resolución de problemas, presenta una serie de ventajas e inconvenientes, por lo que es preciso conocerlas para saber cómo preparar nuestra estructura para el análisis y qué resultados podemos esperar.

Las ventajas son las siguientes:

- La dinámica computacional de fluidos es capaz de presentar, con gran precisión, los datos de las propiedades del fluido que gobiernan el problema.
- Gracias a que permite la simulación con un alto grado de exactitud, permite ahorrar en tiempo y dinero en prototipos y simulaciones reales.
- Permite visualizar una animación del proceso según las variables del fluido.

Sin embargo, no es una herramienta perfecta y entre las desventajas se encuentran las siguientes:

- Es necesario que el usuario que se disponga a utilizar la herramienta CFD tenga conocimientos y una formación precisa.
- Debido a que es una herramienta muy potente, consume recursos de software y hardware por lo que puede ser necesario realizar una inversión significativa para conseguir buenos resultados.
- Es posible que en algunas simulaciones, el coste de cálculo computacional sea elevado.



## 9.7. ANSYS

La herramienta CAE utilizada para realizar la simulación CFD es el *Ansys*. El software *Ansys* contiene las amplias características de modelado físico que se necesitan para modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de una aeronave a la combustión en un horno, desde columnas de burbujas a plataformas petrolíferas, desde el flujo de sangre a la fabricación de semiconductores, y desde el diseño de una sala blanca a plantas de tratamiento de aguas residuales. Para ampliar su alcance, se han utilizado modelos especiales que dan al software la capacidad de modelar sistemas de combustión dentro de cilindros, modelos aeroacústicos, turbomaquinaria y modelos multifase.

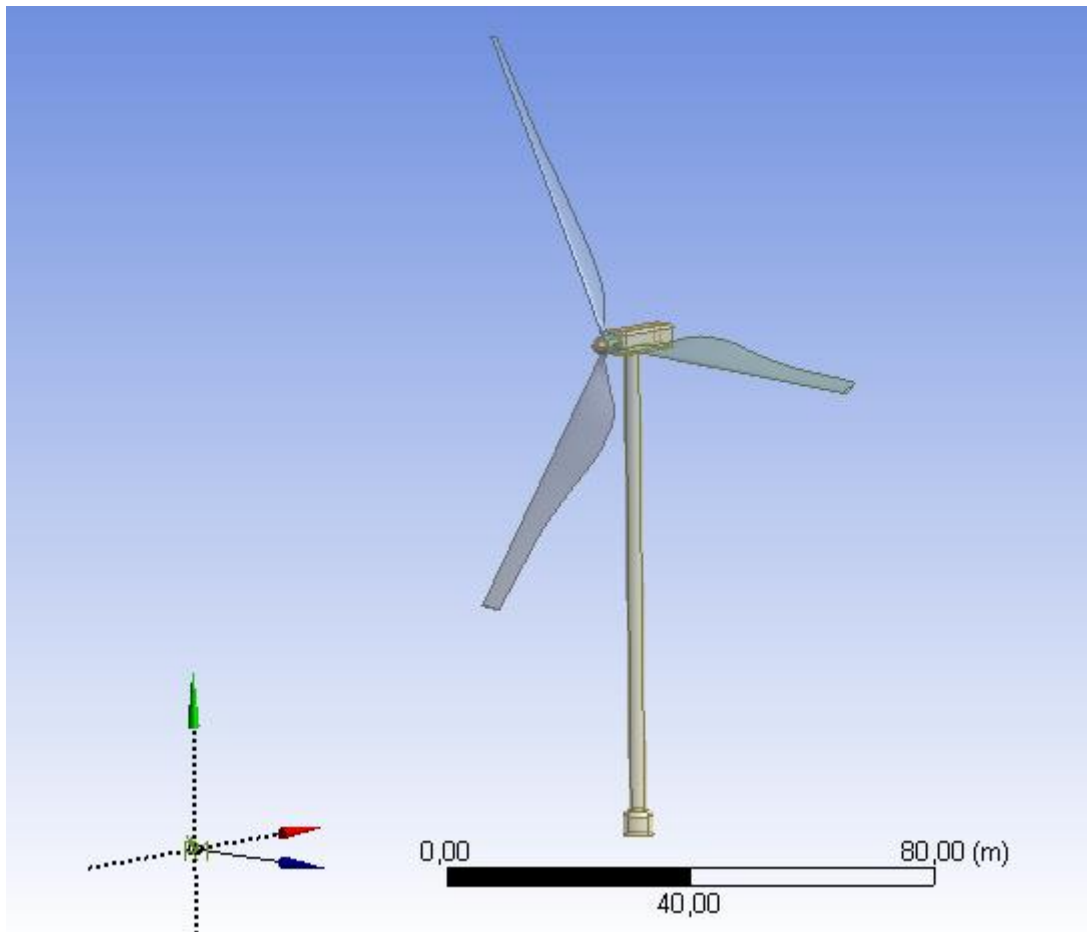
*Ansys* está dividido en tres sectores, los cuales son las herramientas que el software utiliza para la resolución del problema y reciben el nombre de módulos. Los módulos son el pre-procesador o creación de geometría y mallado, procesador y post-procesador. Todos estos módulos están organizados en el *Workbench*, la interfaz principal de *Ansys* que permite un fácil acceso a todos los módulos. Para este problema usaremos la opción de *Fluent*, elegida en el *Workbench*.

## 9.8. DESIGN MODELER

La primera etapa que hay que completar dentro del *Workbench* es la del tratamiento de la geometría que se ha creado anteriormente en el software CAD, ya que necesita cierta preparación antes de que empiece la simulación. El software *Ansys* permite además la importación de la geometría creada, gracias a la compatibilidad de archivos.

Esta preparación es necesaria debido a que hay partes que no son interesantes que se simulen, bien sea porque no son funcionales en la geometría a simular o porque así se ahorra tiempo en el proceso. Esta modificación de partes puede llevarse a cabo dentro del módulo *Design Modeler* ya que la geometría que se va a simular no tiene partes complicadas o sin importancia para la simulación.

Lo primero que hay que realizar es la importación del archivo creado por el software CAD. Es importante que el formato del archivo importado sea *.step* ya que si no el software *Ansys* no será capaz de leerlo.

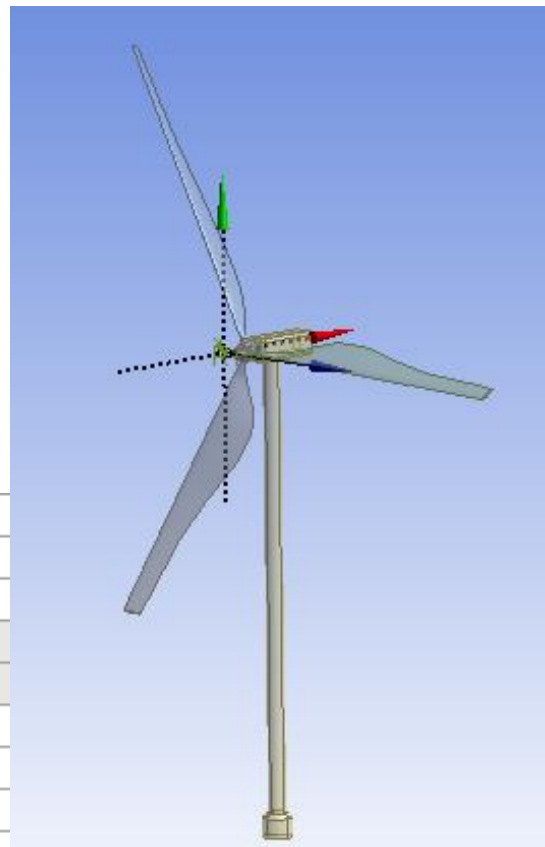


*Figura 62: Importación de la geometría desde el software CAD al software CAE*

Una vez que la geometría se encuentra importada y nos aseguramos de que no existe ningún problema, como por ejemplo que no se cree la geometría sin ser un sólido cerrado, podemos pasar a realizar ciertas operaciones de preparación de la estructura que nos facilitarán el trabajo posterior.

La primera operación que se ha realizado es la de traslación debido a que será mucho más cómodo si la nariz del aerogenerador se encuentra en el origen de coordenadas y con uno de los ejes en la dirección del movimiento del aire. Así cuando tengamos que introducir los datos, simplemente habrá que pensar en el eje que interese para darle el valor que queramos. En nuestro caso, los valores dados para la traslación son de -40 metros para el eje X, -84 metros para el eje Y y de -51,5 metros para el eje Z.

Details of Translate1	
Translate	Translate1
Preserve Bodies?	No
Bodies	6
Direction Definition	Coordinates
<input type="checkbox"/> FD3, X Offset	-40 m
<input type="checkbox"/> FD4, Y Offset	-84 m
<input type="checkbox"/> FD5, Z Offset	-51,5 m



Figuras 63: Datos de la traslación y resultado de la misma

Posteriormente, se ha realizado un escalado debido a la gran magnitud del aerogenerador, ya que puede provocar que la simulación tarde mucho en realizarse o que el ordenador no sea capaz de llevar a cabo la simulación que se le requiere. Por ello, se le somete a la estructura a un valor de escalado de 1:100.

Details of Scale1	
Scale	Scale1
Preserve Bodies?	No
Scaling Origin	World Origin
Bodies	6
Scaling Type	Uniform
<input type="checkbox"/> FD1, Global Scaling Factor (>0)	0,01

Figura 64: Datos de la operación de escalado





Figura 65: Resultado de la operación de escalado

Después se ha realizado una operación de rotación para colocar la nariz del rotor en la dirección del eje Z, simplemente por una cuestión de criterio de ejes, ya que no tiene que ver con nada imprescindible para la simulación. Como se puede observar en la figura 67, el vector verde del eje Y está en la vertical y el vector rojo del eje X se encuentra en la horizontal, por lo que el vector azul del eje Z se encuentra de punta (saliendo de la imagen). En la figura 66, se muestran los valores utilizados para realizar el giro del aerogenerador.

Details of Rotate1	
Rotate	Rotate1
Preserve Bodies?	No
Bodies	6
Axis Definition	Components
<input type="checkbox"/> FD6, X Component	0
<input type="checkbox"/> FD7, Y Component	1
<input type="checkbox"/> FD8, Z Component	0
<input type="checkbox"/> FD10, X Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD11, Y Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD12, Z Coordinate	0 m
<input type="checkbox"/> FD9, Angle	-270 °

Figura 66: Valores de la operación de rotación del aerogenerador

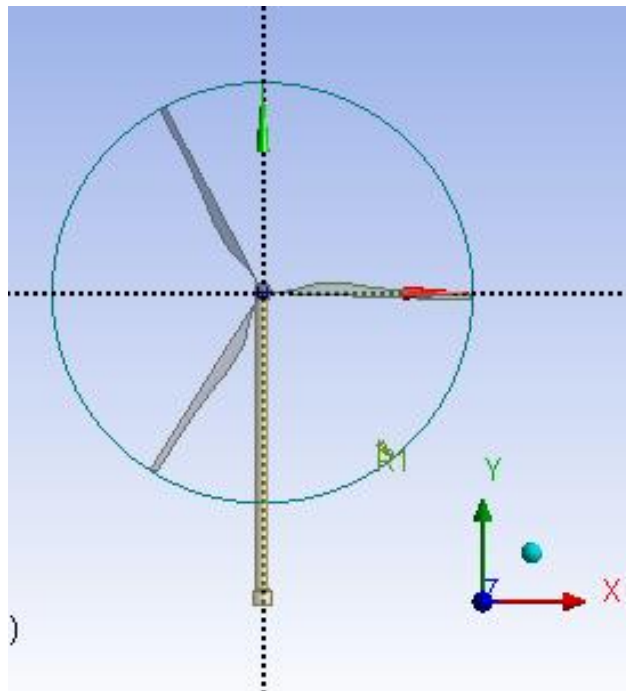


Figura 67: Situación del aerogenerador en relación a los ejes de coordenadas

La siguiente operación es la de “*Surfaces from edges*”, la cual sirve para crear superficies a partir de aristas. En la figura siguiente, se puede observar las superficies creadas, las cuales corresponden con las superficies internas de las palas del aerogenerador que se encuentran en contacto con el buje y que se utilizarán más adelante para seleccionar áreas de contacto en el apartado previo de empezar la simulación.

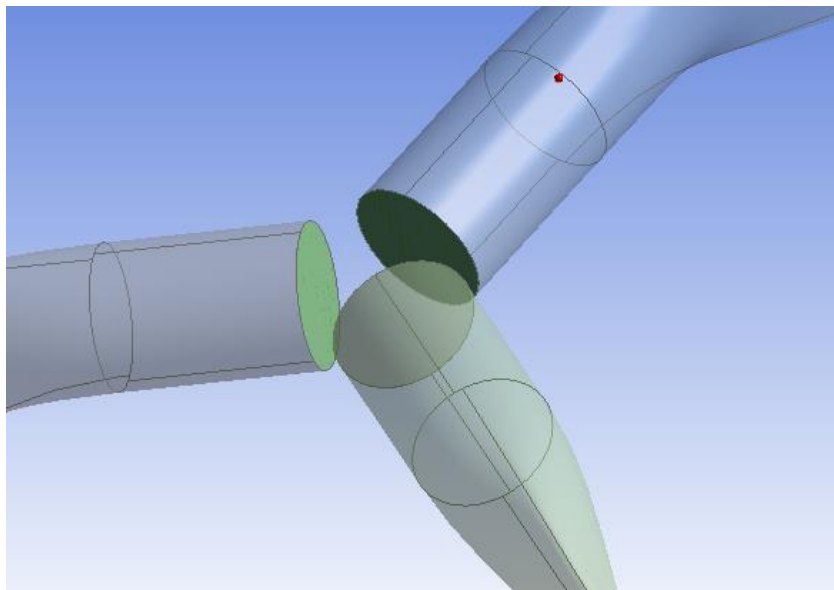
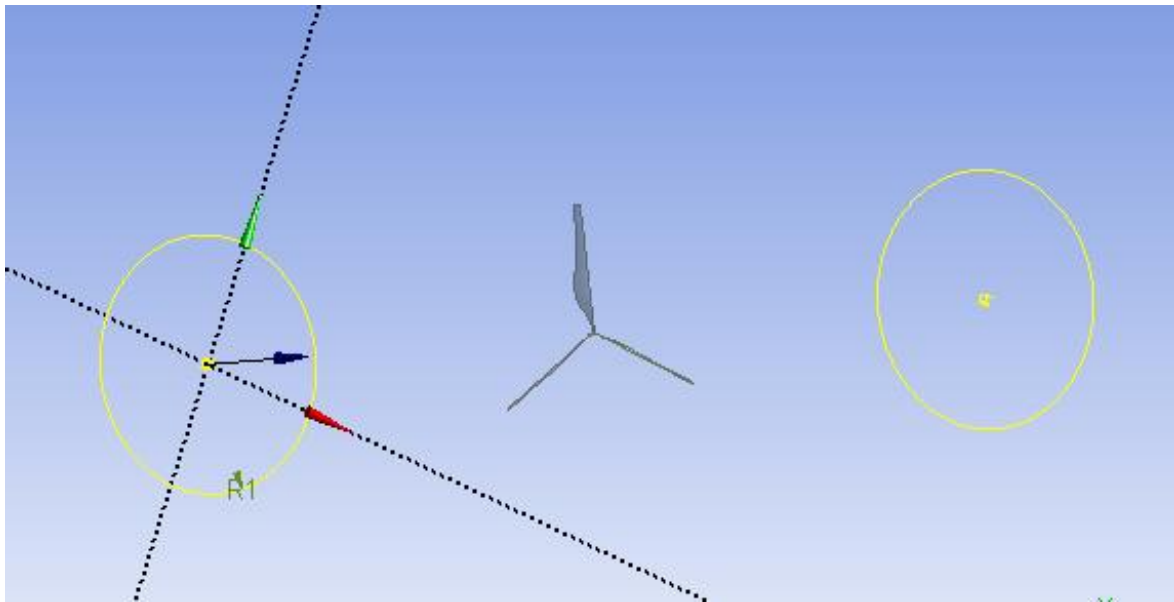


Figura 68: Superficies creadas en el aerogenerador

Seguidamente, es necesario crear el volumen de control para indicarle al software CAE (*Ansys Fluent*) por donde va a circular el fluido. Este volumen de control se puede crear en el propio software CAE, si la figura a crear es sencilla, o puede ser creada en el software CAD, si por ejemplo el fluido va a recorrer elementos que serían más complicados de ajustar en el *Ansys*.

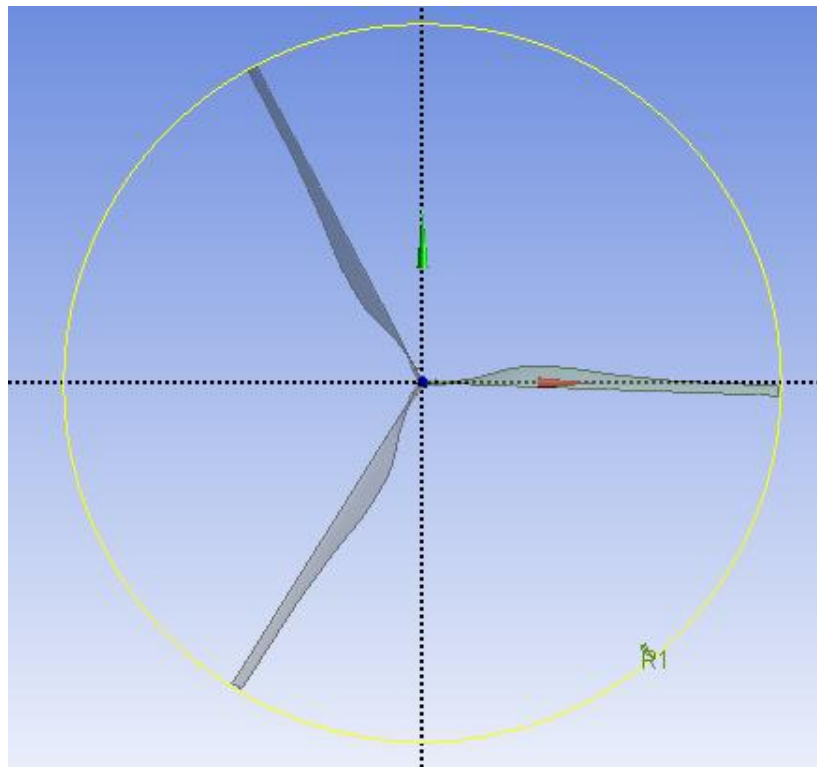
En nuestro caso, el fluido simplemente va a ir direccionado a barlovento o sotavento, es decir, va a incidir directamente sobre las aspas del aerogenerador y seguirá su camino cuando atraviese a éstas. Por ello, este volumen de control es fácil de construir en el *Ansys*.

Para ello se crean dos planos paralelos entre sí y paralelos al plano que crean las palas de aerogenerador cuando giran. Estos planos tienen que estar distanciados por una distancia considerable para permitir que el fluido pueda desarrollarse o no se produzcan turbulencias y la solución llegue a converger. Los planos se encuentran distanciados 3 metros cada uno del aerogenerador por lo que la distancia entre ellos es de 6 metros.



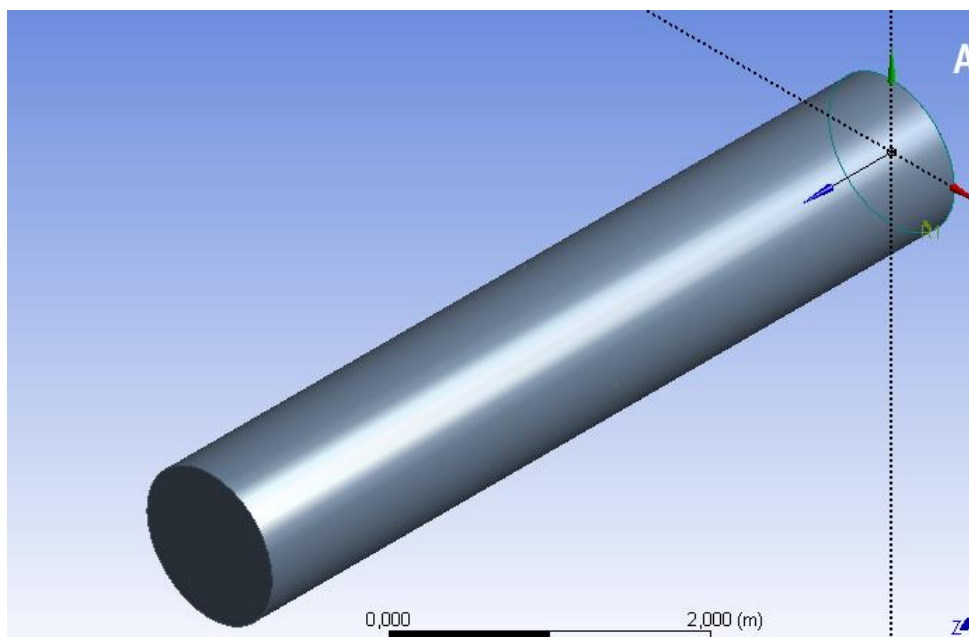
*Figura 69: Situación de los planos con respecto del aerogenerador*

Una vez que los dos planos han sido creados, se utiliza el comando “Sketch” (croquis) para dibujar en ellos 1 circunferencia cuyos diámetros son el diámetro del rotor del aerogenerador. El diámetro de las circunferencias es 0,56 m (la estructura se encuentra escalada 1:100).



*Figura 70: Croquis de las circunferencias en los planos*

Con los planos ya creados, se ejecuta el comando “Skin”, el cual permite crear figuras a partir de perfiles creados y añade material a la figura creada. Por ello, seleccionando los dos planos creados podemos construir el cilindro que nos servirá de volumen de control.



*Figura 71: Cilindro creado por el comando “Skin”*

[-] <b>Details of Skin1</b>	
Skin/Loft	Skin1
Profile Selection Method	Select All Profiles
Profiles	2 Sketches
Operation	Add Material
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	No
[-] <b>Profiles</b>	
Profile 1	Sketch1
Profile 2	Sketch2

Figura 72: Datos de la operación "Skin"

El siguiente paso y último del módulo "Design Modeler" es el booleano. En las operaciones booleanas hay múltiples opciones, pero en este caso hay que escoger la opción "Subtract". Esta opción sirve para restar de un sólido el volumen de uno o más sólidos, generando un objeto basado en la geometría restante. Esto es necesario porque el cilindro ha sido creado atravesando las palas de aerogenerador y se quiere que cuando se le indique al software que las palas giren, la malla no se deforme. Por ello, haciendo uso de este comando le indicamos al programa que el "target body" o elemento objetivo es el cilindro y que los "tool bodies" o elementos herramienta que se van a restar son los distintos elementos del aerogenerador, siendo el resultado el de la imagen adjunta (figura 73). En este booleano, los cuerpos herramienta, es decir, los álabes no se borran de la estructura por lo que simplemente se le indica al software que separe estos dos elementos

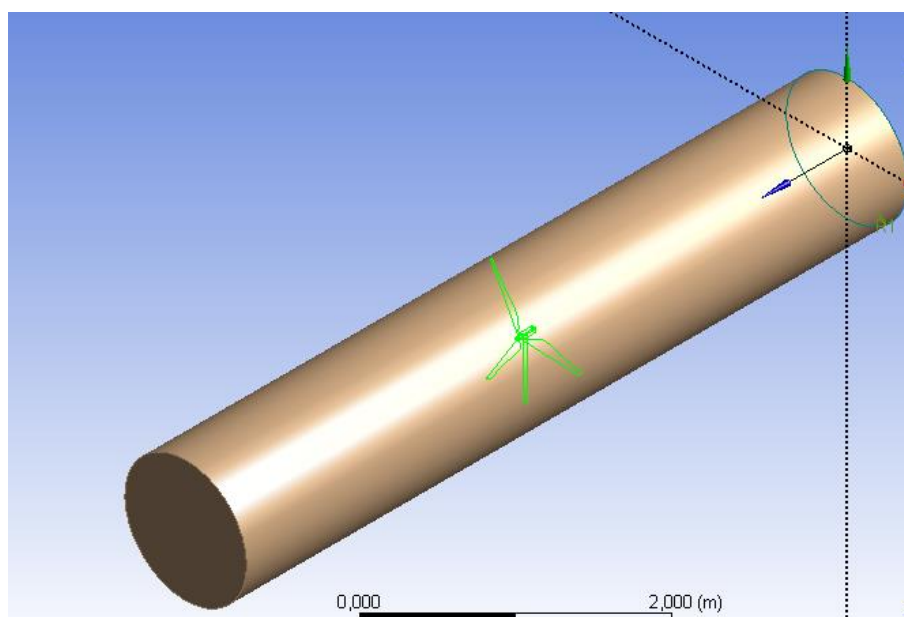


Figura 73: Estructura que resulta de aplicar el primer booleano

Es necesario realizar un segundo booleano con la misma operación de *Subtract*, pero indicándole en este caso que elimine las palas de la estructura por lo que se quedará un hueco dentro del volumen de control. Como cuerpo objetivo será el propio volumen de control y como cuerpo herramienta serán las palas de nuevo, pero sin preservar los cuerpos herramienta.

## 9.9. MALLADO DE LA ESTRUCTURA

Este módulo se utiliza para crear la malla de nuestra estructura. Este apartado es el más difícil y el más importante de todo el software, ya que dependiendo de la calidad de la malla que consigamos, el resultado de la simulación será mejor o peor, incluso provocando que los resultados no converjan.

Lo primero que hay que hacer nada más entrar al módulo es identificar las zonas del volumen de control que sirven de referencia para el software y le ayuda a saber por dónde entra o sale el fluido del volumen de control o cuál es la pared del volumen de control. Esta operación la realizaremos con el comando "*Create Named Selection*" con la que vamos eligiendo superficies y nombrándolas. Se crean la entrada del fluido (*Inlet*), la salida del fluido (*Outlet*), la pared del volumen de control (*Wall*) y los alabes (*Blades*).

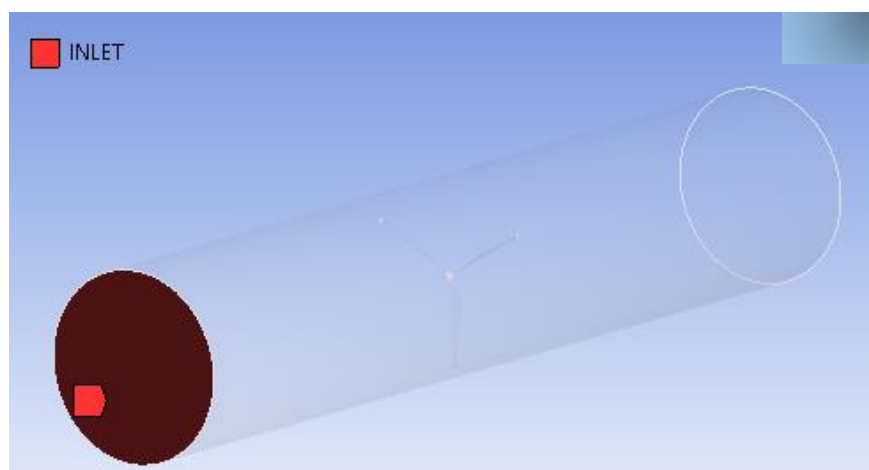


Figura 74: Identificación de la entrada con el comando "*Named Selections*"

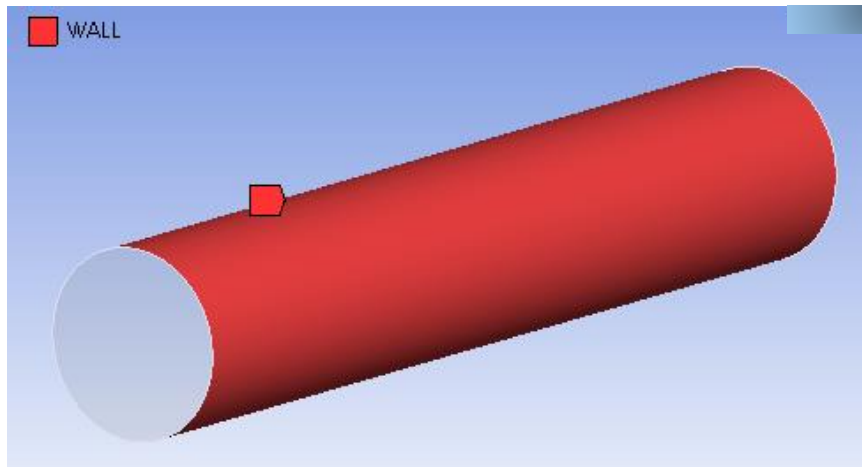


Figura 75: Identificación de la pared con el comando "Named Selections"

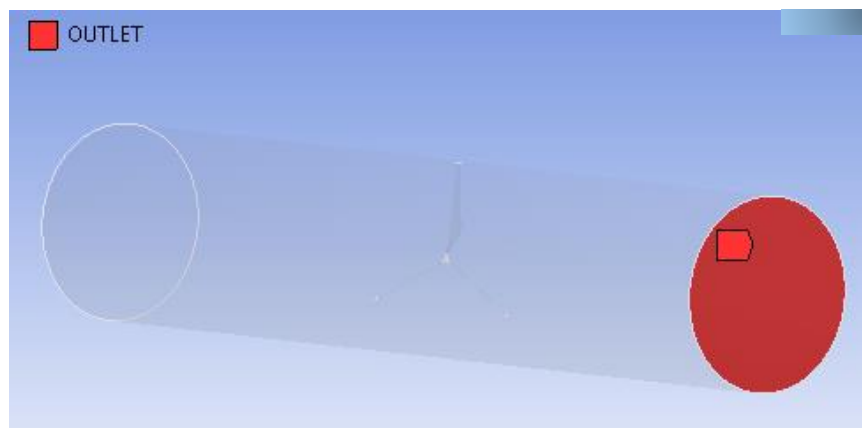


Figura 76: Identificación de la salida con el comando "Named Selections"

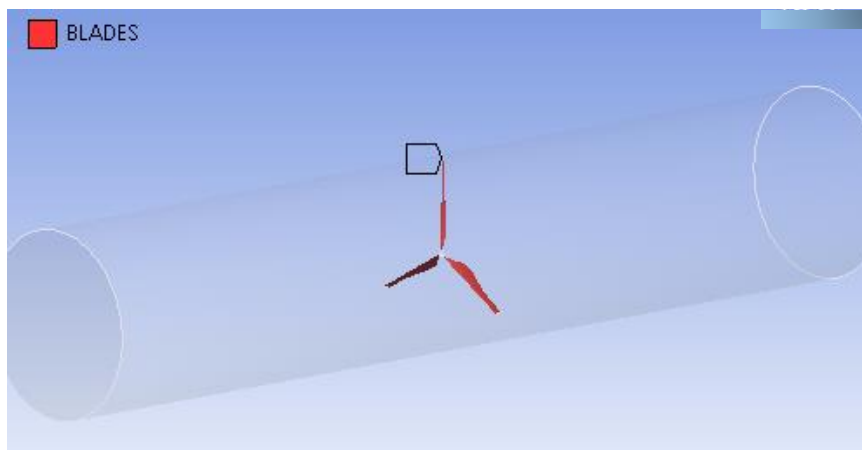


Figura 77: Identificación de las palas del aerogenerador con el comando "Named Selections"

La malla que se va a crear es una malla no estructurada para que la malla pueda ajustarse perfectamente a la forma que tiene la estructura. Lo primero que debemos realizar es indicarle al *Ansys* que características queremos que nuestra malla tenga. Le indicamos al software el tipo de análisis que se va a hacer, el cual es CFD y la

simulación se va a resolver por medio de la aplicación *Fluent*. Esto sirve para que el programa sepa cómo se va a simular la geometría importada y qué correcciones debe hacer.

[-] <b>Display</b>	
Display Style	Body Color
[-] <b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0

Figura 78: Identificación del tipo de simulación a realizar

Antes de darle a generar la malla debemos también especificar ciertos apartados o variables para indicarle al *Ansys* cómo se va a construir la malla en la geometría.

La primera variable que hay que indicarle al programa es el *Sizing*, es decir, el tamaño que va a tener la malla. Dentro de este apartado se desglosan más variables que también tenemos que modificar para conseguir un resultado óptimo.

El uso de la función avanzada de tamaño se definirá como *Proximity and Curvature*, esencial para que el software vaya adaptando la malla al tipo de estructura que hay que mallar. El centro de relevancia será fino, el tratamiento que el programa dé a las celdas será de ensamblado completo cuyo suavizado será alto y con una transición lenta. Estas opciones sirven para conseguir que, aunque la malla sea no estructurada, se pueda crear una malla que se ajuste perfectamente a nuestros requerimientos, conseguir buena calidad de la misma y facilitar la simulación en lo máximo posible.

[-] <b>Sizing</b>	
Use Advanced Si...	On: Proximity and Curvature
Use Fixed Size Fu...	No
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Full Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (18.0°)

Figura 79: Parámetros elegidos en el apartado de *Sizing* para creación de la malla

Una vez que se ajustan estos parámetros dentro del apartado de *Sizing*, se crea una malla con esas especificaciones, pero puede ser que la cantidad de elementos creados no sean los suficientes y por ello, existen otras variables modificables para



llegar a una cantidad de elementos que hagan que la malla sea óptima. Estas variables son los ángulos de curvatura, el número de celdas, el tamaño mínimo y máximo de las celdas y de las caras, el ratio de crecimiento y la longitud mínima de los bordes. En este apartado, lo único que se ha modificado es el tamaño mínimo para conseguir una mayor cantidad de elementos y evitar que el programa cree el número de elementos por su cuenta.

El siguiente apartado es el de *Inflation*, donde se puede modificar la capa límite del mallado definiendo una transición suavizada, cuyo ratio es de 0,272 y una relación de crecimiento de 1,2.

Además de todos los parámetros ajustados anteriormente, se ha creado también un método de mallado para conseguir que los elementos creados en la zona de las palas sean más pequeños y que la simulación llegue a ser más precisa. Este método es el *Face Sizing*, donde se eligen las palas del aerogenerador y se selecciona un tamaño mínimo de elementos de 1,3 milímetros.

Con estos valores y después de muchos intentos se conseguirá un mallado, como se puede observar en la siguiente imagen:

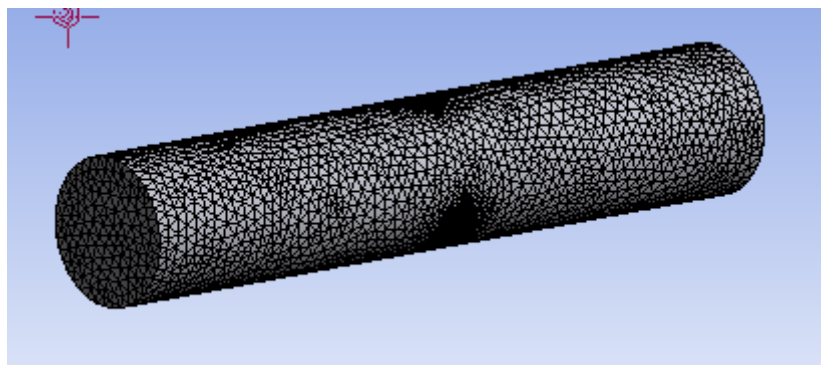


Figura 80: Mallado resultante de la estructura

Este mallado tiene un número de elementos de 4407291, lo cual puede ser suficiente para llevar a cabo la simulación.

Sin embargo, tenemos que comprobar que la calidad de la malla conseguida también es la óptima para la simulación. Esto se puede comprobar en el módulo *Setup* ya que es aquí donde el software analiza si existe algún tipo de problema con la malla creada. Más tarde se puede comprobar la calidad de la misma utilizando tres criterios para valorar la calidad:

- Máxima inclinación ortogonal, valores de 0 a 1, donde valores cercanos a 0 corresponden a una baja calidad.

- Mínima calidad ortogonal, valores de 0 a 1, donde valores cercanos a 1 corresponden a una baja calidad.
- Máxima relación de aspecto, aunque este parámetro no da mucha información sobre la calidad de la misma interesa que este valor sea lo más bajo posible, aunque si el valor es alto no quiere decir que la malla sea mala.

El número de elementos creados en esta malla y la calidad de la misma son suficientes para llevar a cabo la simulación, ya que la calidad de la malla está dentro de los parámetros establecidos para tener una correcta calidad de la misma. Sin embargo, este no ha sido el único y primer intento de mallado, ya que ha habido que estar probando hasta conseguir un buen mallado. Se hizo otra prueba, la malla 2, en donde el volumen de control era de menor longitud, pero no se escogió por fallos de visualización de los resultados ya que no dejaba ver cómo el fluido giraba al atravesar las palas del aerogenerador. En la siguiente tabla se puede observar los datos de la malla escogida y de las otras dos mallas desechadas:

Mallas	Nº de elementos	Calidad de las mallas		
		Máxima inclinación ortogonal	Mínima calidad ortogonal	Máxima relación de aspecto
1 (elegida)	4407291	$5.03781e^{-3}$	$9.62689e^{-1}$	$2.29975e^{+2}$
2 (desechada)	4567244	$1.58158e^{-3}$	$9.68021e^{-1}$	$2.47423e^{+2}$
3 (desechada)	5129804	$1.38385e^{-4}$	$9.28759e^{-1}$	$1.02721e^{+2}$

Tabla 3: Elementos y calidades de las mallas creadas

Como se puede observar en la tabla 3, aunque la malla elegida tiene menos elementos, la calidad es mejor ya que el valor de la máxima inclinación ortogonal es el más cercano a 1, lo que indica que tiene una calidad mayor que las demás. El valor de la mínima calidad ortogonal es prácticamente igual en los tres mallados, siendo un poco menor y por lo tanto, mejor en la malla 3. El valor de la máxima relación de aspecto es también muy parecido en los tres casos y aunque la malla 3 es mejor es los dos últimos valores comentados, el número de elementos es mayor y la simulación tendrá que utilizar más tiempo para llegar a la resolución del problema y por ello, se ha terminado desechando también.

La malla 3 tiene la misma estructura y dimensiones que la malla 1 pero cambia en las distintas variables que se pueden ajustar para crear la malla. En la siguiente imagen se puede observar la malla 2 creada, en la cual el volumen de control es de menor longitud:

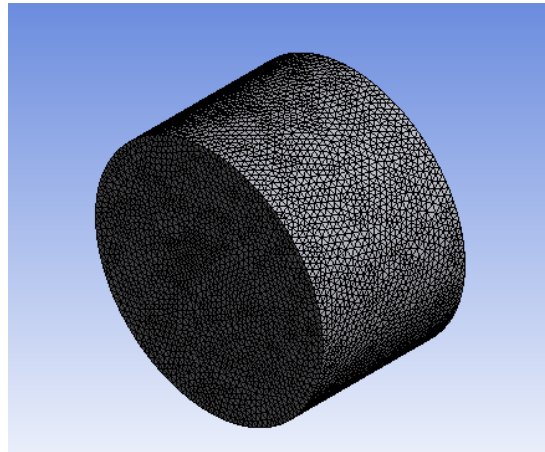


Figura 81: Mallado 2

## 9.10. FLUENT Y SETUP

El *Fluent* es el método que utiliza *Ansys* para resolver este tipo de simulaciones en CFD en donde se harán uso de las ecuaciones correspondientes y que nos dará los resultados de la simulación.

El software *Ansys* contiene numerosos módulos dependiendo de la aplicación que vaya a tener lo que se quiera simular. En nuestro caso, el software *Ansys Fluent* es el perfecto para resolver la geometría que queremos simular debido a que es el software que utiliza la dinámica computacional de fluidos más potente del mercado.

Cuando se inicia el módulo *Setup* del *Ansys Fluent*, lo primero que vemos es una ventana en donde se pueden seleccionar varias opciones. Se ha elegido la opción de doble precisión, que hará que la simulación sea más lenta, pero a su vez los resultados serán más precisos. También se ha impuesto que la simulación sea en modo paralelo y que esté realizada por tres de los cuatro procesadores de los que dispone el ordenador. Hay que decir que el ordenador utilizado no es muy potente y, por tanto, las simulaciones conllevan mucho tiempo.

Una vez dentro del módulo *Setup* empezamos ya a ver que es aquí donde hay que elegir las condiciones de la simulación. Lo primero que nos encontramos es el apartado *General* en donde se eligen las condiciones principales de la simulación y se comprueba si existe algún problema con la malla. Es aquí donde podemos saber cuál es la calidad de la malla anteriormente mencionada

Ahora ya es cuando empezamos a seleccionar las opciones para definir nuestra simulación. En *General*, elegimos las opciones de basado en la presión y que sea transitorio. La opción de basado en la presión se elige ya que el aire apenas cambia sus propiedades cuando atraviesa el rotor y las velocidades no son valores elevados.

Seguidamente, en el apartado de *Models*, seleccionamos las opciones de la simulación. Simplemente hay que activar la opción de la viscosidad y elegimos que sea “K-epsilon” y “realizable” con funciones de la pared escalables (visto en el apartado de la teoría aplicada a los aerogeneradores).

Después, se encuentra el apartado de *Materials*, en donde se escogen los materiales para la simulación que en este caso será el aire para el fluido y el aluminio para el sólido.

El siguiente apartado es de *Cell Zone Condition*. En este apartado se impone el giro que va a tener la figura y por ello seleccionamos la opción “Mesh Motion” y le ponemos el valor del giro de  $-2,5$  rad/s. Asimismo conseguimos que la malla gire y se produzca la simulación del giro del rotor.

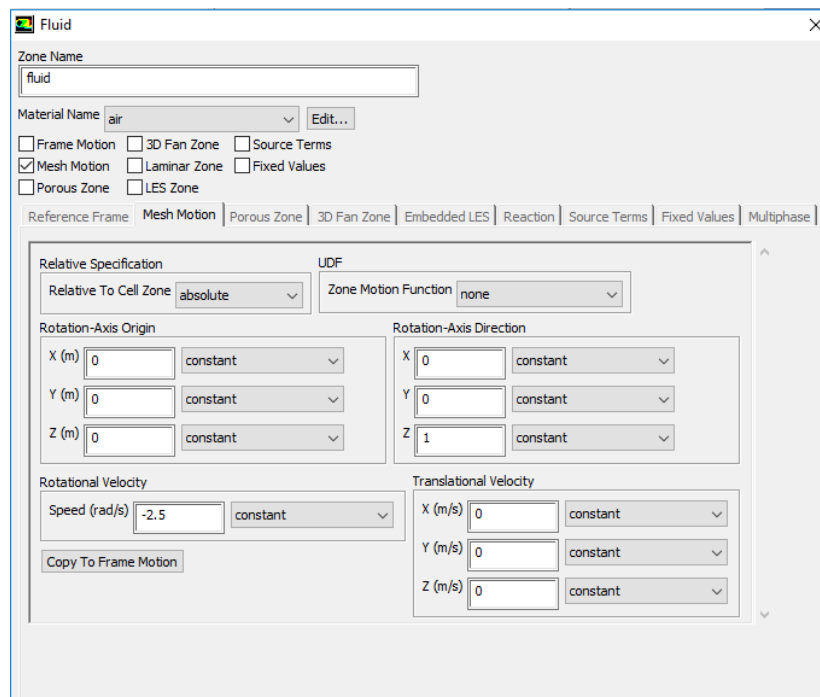


Figura 82: Cell Zone Conditions

Después viene la elección de las condiciones de contorno de las zonas que se han creado anteriormente en el módulo *Mesh*. Se selecciona la opción de la entrada (Inlet) y se impone la condición de la velocidad a la entrada. Al elegir la opción de velocidad en la entrada, elegiremos que la velocidad esté direccionada gracias a las componentes cartesianas, con lo que le pondremos el valor de  $-12$  m/s en el eje Z. También, se elegirá la opción para la turbulencia, en donde elegimos la opción de “Intensity and Viscosity Ratio” y *Ansys* se ocupará de poner los valores oportunos para la opción elegida.

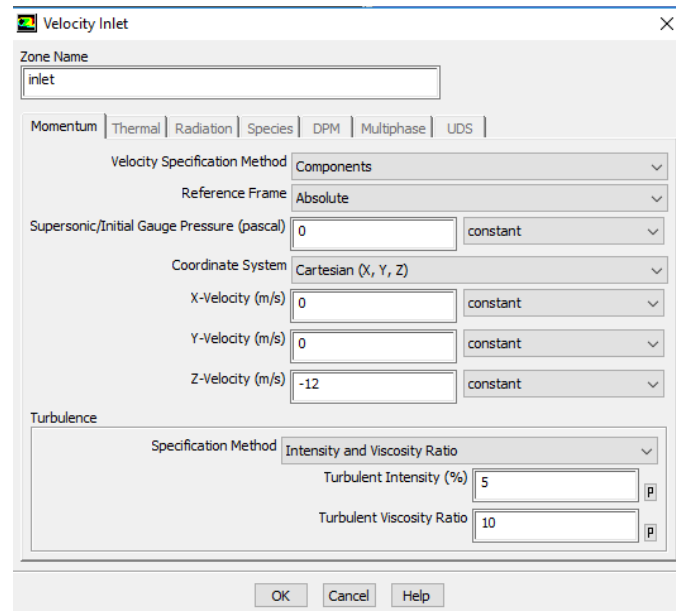


Figura 83: Condiciones de contorno de la entrada y de la pared

Para la zona de la pared (Wall), se elige la misma opción que a la entrada, *velocity inlet* y con los mismos valores que antes. Seguidamente, elegimos la opción para la salida de *pressure outlet* y finalmente para el interior elegimos la opción de *interior*. En *pressure outlet* no hace falta imponerle la diferencia de presión ya que variación de presiones cuando el aire atraviesa el rotor es mínima.

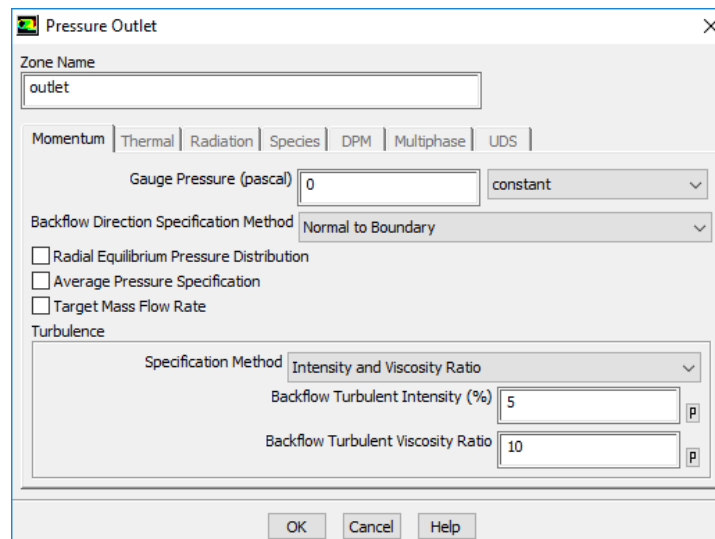


Figura 84: Condiciones de contorno a la salida

El siguiente apartado es el de la comprobación de las regiones de contacto, es decir, ver que se encuentra definidas correctamente y no existe solapamiento. Para realizar esta acción debemos entrar en la opción de *Mesh interfaces* y nombramos la zona de contacto como "interface alabes".

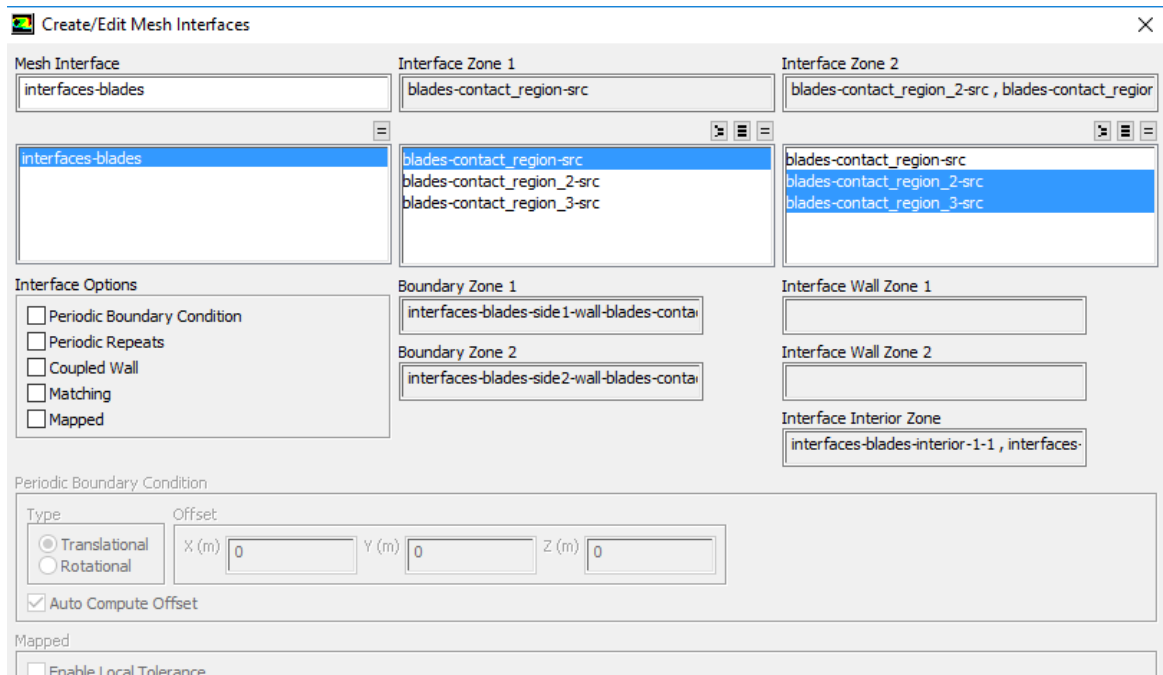


Figura 85: Mesh interfaces, regiones de contacto

En el apartado de *Solution* se van a elegir las condiciones de la simulación. En el primer subnivel, los *Solution Methods*, se selecciona la opción de *Coupled* en el desplegable de *Scheme* y la opción de *High order term relaxation*.

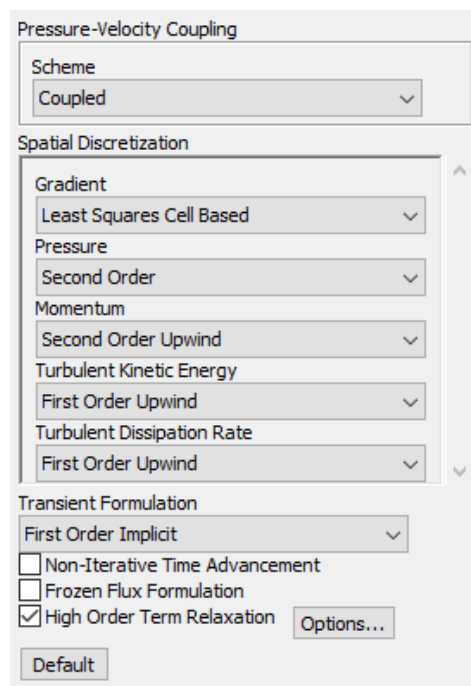


Figura 86: Solution Methods

Luego hay que modificar los criterios de convergencia para nuestra simulación. Esto se realiza en el apartado *monitors*, ya que es aquí donde se puede escoger si se

quiere que el criterio sea absoluto o relativo, y el valor de todos los residuos, como son la continuidad, la velocidad en cada uno de los ejes o k-épsilon. Se va a imponer que el valor de todos estos residuos sea  $1e^{-6}$ , aunque es posible que se pueda alcanzar la convergencia antes.

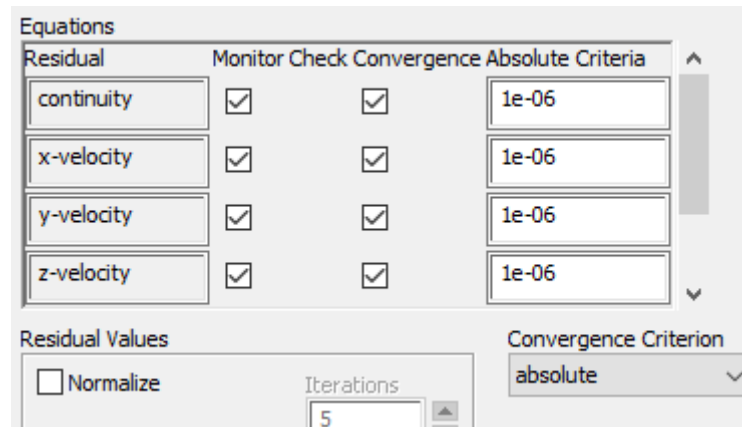


Figura 87: Residual Monitors

En el mismo apartado de *monitors*, hay que indicarle al *Ansys* también para dibuje un gráfico de los alabes en función de las distintas variables para luego poder visualizar los resultados al término de la simulación.

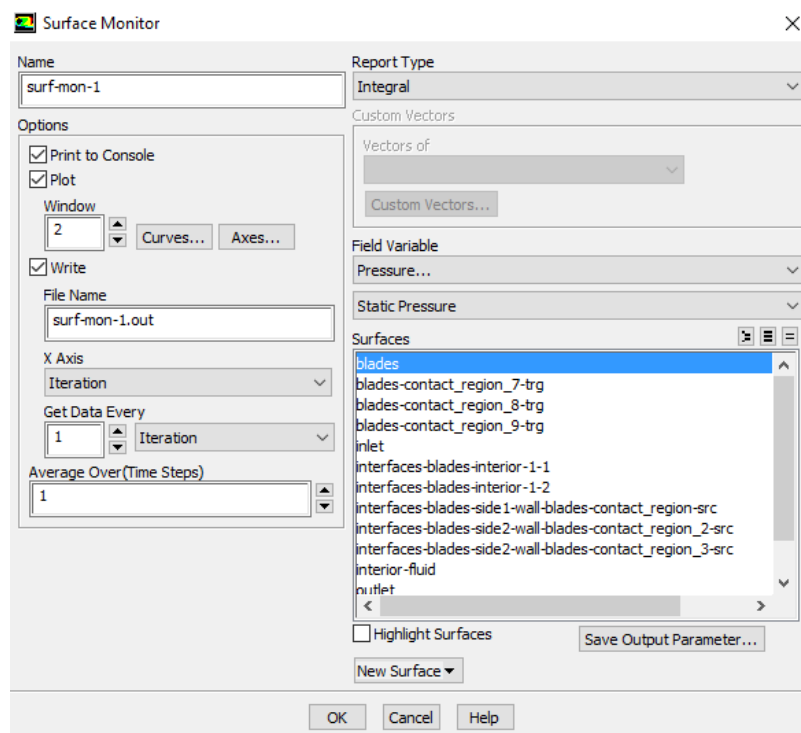
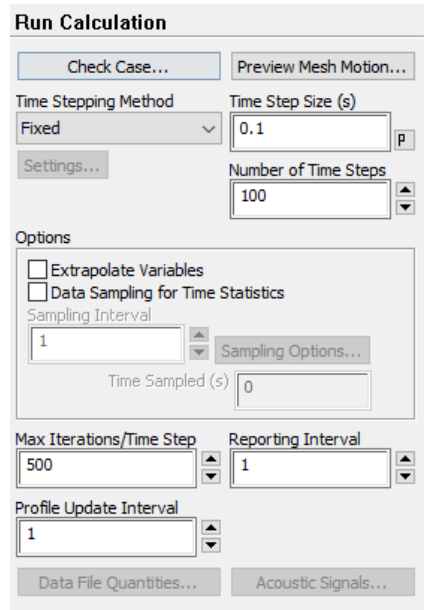


Figura 88: Surface Monitors

El siguiente apartado es el de *Run Calculation*, donde se establece el número de iteraciones a realizar. Como se ha impuesto que la simulación sea transitoria, el tiempo de paso es de 0,1 segundos, tiempo bajo para conseguir que se aprecien todos los resultados correctamente. Se establece también que el número de iteraciones sea de 500. Se ponen pocas iteraciones debido a que el flujo no se va a desestabilizar mucho y en una vuelta que dé el rotor, ya pueden obtenerse los resultados.



**Run Calculation**

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed (dropdown)  
Time Step Size (s): 0.1  
Number of Time Steps: 100

Options

☐ Extrapolate Variables  
☐ Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1  
Time Sampled (s): 0

Max Iterations/Time Step: 500  
Reporting Interval: 1

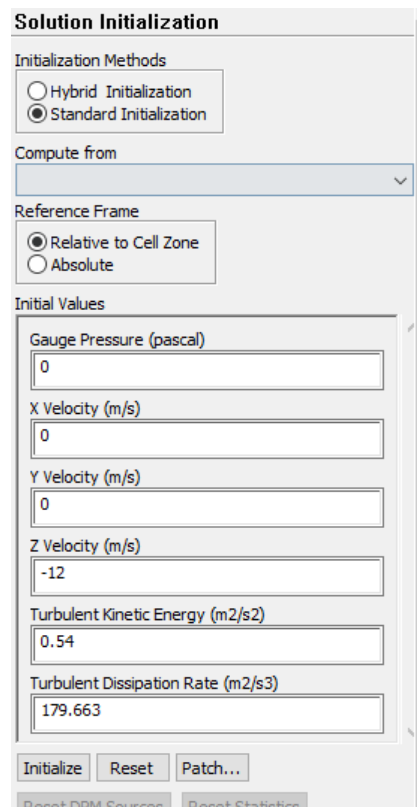
Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals...

Figura 89: Run Calculation

Antes de darle a que empiece a simular, hay que establecer que la simulación coja los datos de partida impuestos en las condiciones de contorno de la entrada. Por tanto, dándole en el módulo de *Solution Initialization*, establecemos los datos de partida y le damos a *Initialize* para hacer que el *Ansys* empiece a iterar con esos datos.





The image shows the 'Solution Initialization' dialog box in ANSYS. It contains the following sections and settings:

- Initialization Methods:** ☐ Hybrid Initialization, ☒ Standard Initialization
- Compute from:** A dropdown menu with a downward arrow.
- Reference Frame:** ☒ Relative to Cell Zone, ☐ Absolute
- Initial Values:**
  - Gauge Pressure (pascal): 0
  - X Velocity (m/s): 0
  - Y Velocity (m/s): 0
  - Z Velocity (m/s): -12
  - Turbulent Kinetic Energy (m2/s2): 0.54
  - Turbulent Dissipation Rate (m2/s3): 179.663
- Buttons:** Initialize, Reset, Patch..., Reset DPM Sources, Reset Statistics

Figura 90: Solution Initialization

Por último, podemos indicarle al Ansys que empiece con la simulación dándole a *Calculate* del apartado de *Run Calculation*.

## 10 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la simulación CFD. Para visualizar los resultados se hará uso de la aplicación *CFD-Post*, ya que permite una buena visualización de dichos resultados.

Los resultados que se van a mostrar son la velocidad de las palas, la velocidad del aire al atravesar el rotor, la presión en las palas, la presión aguas abajo del rotor, la turbulencia, la viscosidad de turbulencia y los esfuerzos tales como fuerzas y momentos sobre el aerogenerador, los cuales deben ser más o menos coherentes con la teoría aplicada a los aerogeneradores.

Estos resultados son así ya que la simulación fue basada en la presión, ya que la densidad del aire no va a variar en todo su recorrido y la temperatura tampoco variará sus valores. Así mismo, es la velocidad la variable que tiene más protagonismo por delante de la presión, cuya influencia no es elevada.

### 10.1. VELOCIDAD

En los resultados del análisis de la velocidad, podemos decir que el resultado de la simulación es una muestra perfecta de la teoría aplicada a los aerogeneradores. Según la teoría de Betz, la velocidad a su paso por el rotor se reduce un tercio.

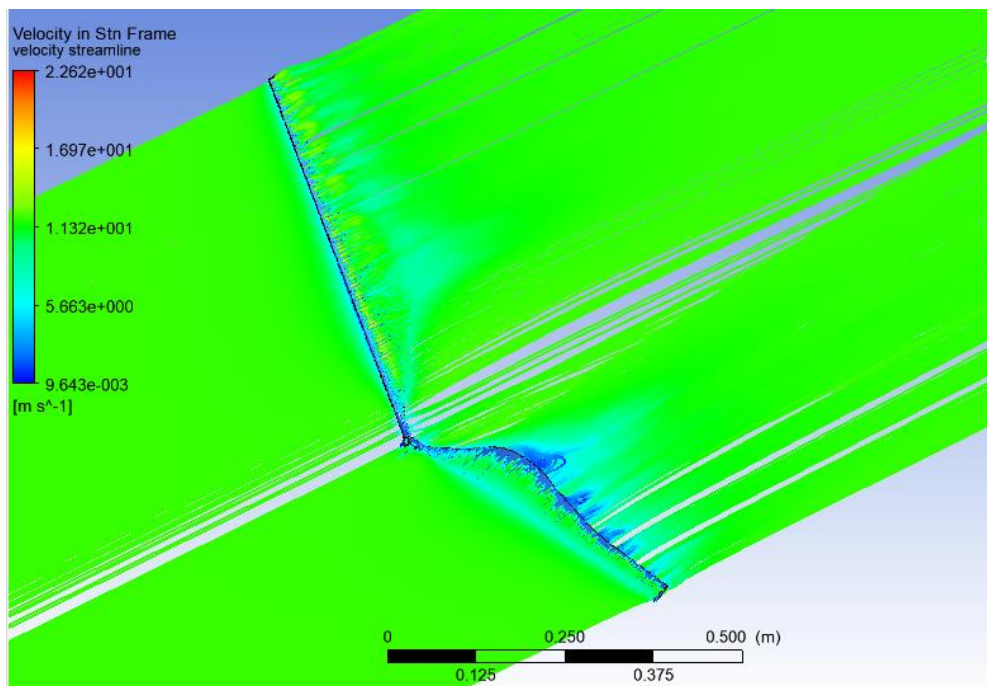


Figura 91: Velocidad del flujo de aire a su paso por las palas

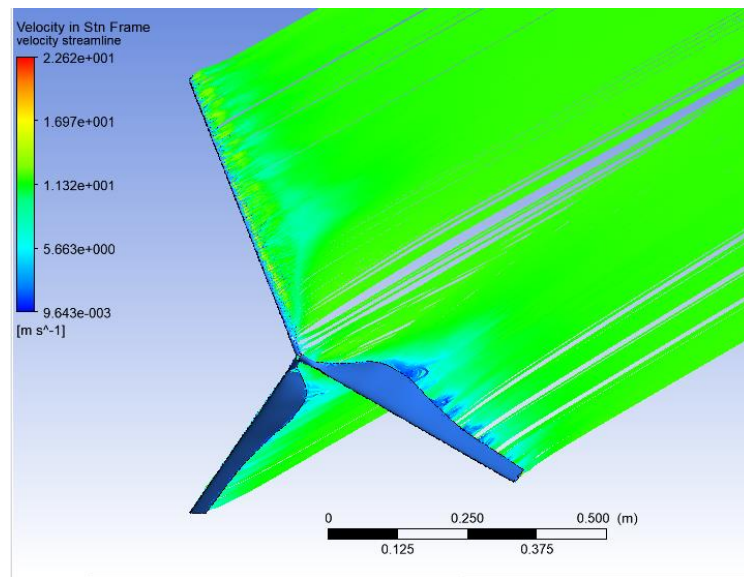


Figura 92: Velocidad del aire al atravesar el rotor

Como se puede observar en las figuras 91 y 92, cuando el aire atraviesa el rotor el aire forma unos vórtices y la velocidad inicial que tenía el aire antes de atravesar el rotor se reduce hasta un valor de aproximadamente 4 m/s, ya que aparecen colores azules más claros y más oscuros. Esto se produce porque cuando el aire incide sobre las palas, existen líneas de flujo que transforman su energía cinética en energía cinética de rotación que permite mover las palas y girar el rotor y por ello, su velocidad disminuye mucho.

Sin embargo, otras líneas de flujo continúan con su velocidad, sin sentir la disminución de velocidad, aunque sí que cambian su dirección, provocando un flujo de aire giratorio, como se puede ver en la siguiente imagen.

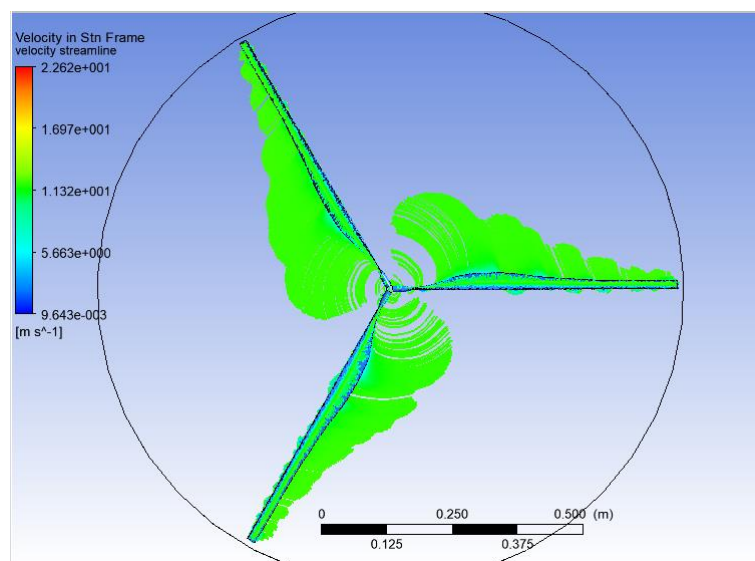


Figura 93: Imagen desde la entrada mostrando el giro del flujo de aire

Otro valor de la velocidad que podemos obtener es el de la velocidad lineal de las palas, el cual es el resultante de la velocidad que tenga el viento cuando atraviese el rotor. La máxima velocidad que se alcanza, lógicamente, es en la punta de las palas y el valor que obtenemos es de 1,322 m/s. En el centro del rotor, es decir, en la nariz, la velocidad es cero.

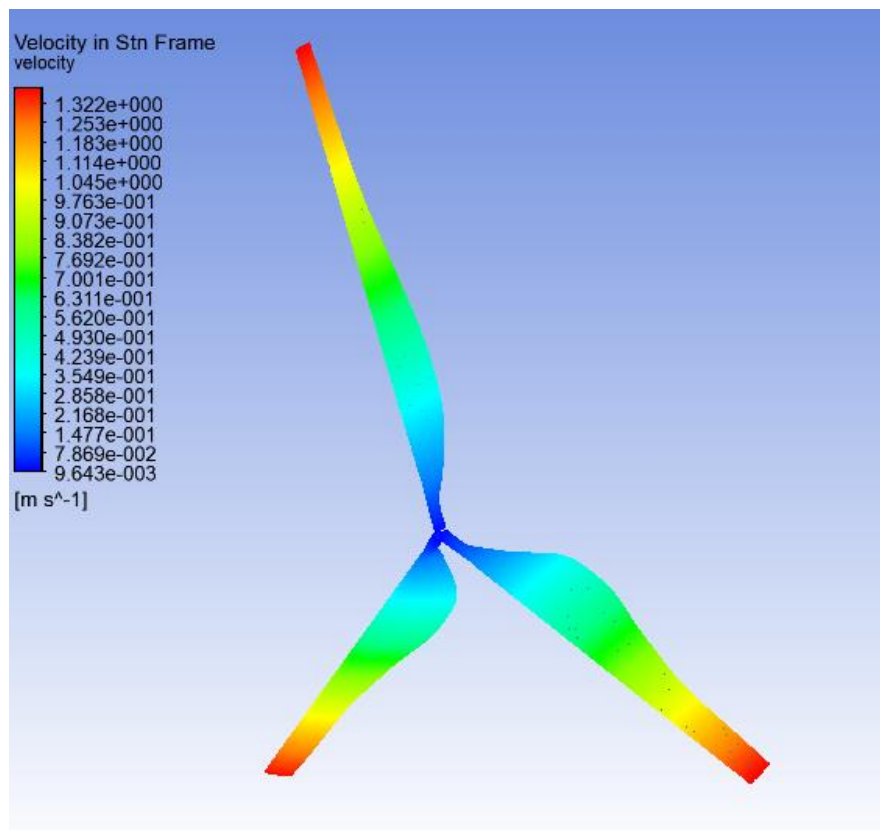


Figura 94: Velocidad lineal de las palas del aerogenerador

## 10.2. PRESIÓN

En cuanto a la presión no hay variaciones significativas. Simplemente, podemos obtener unos valores de presión manométrica que solo varía unos pocos pascales.

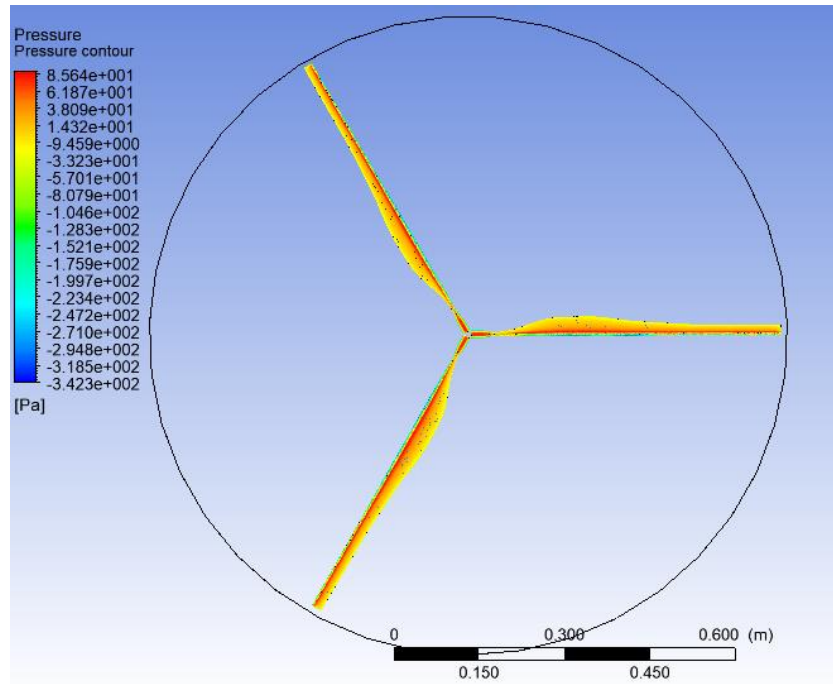


Figura 95: Campo de presiones en las palas del aerogenerador

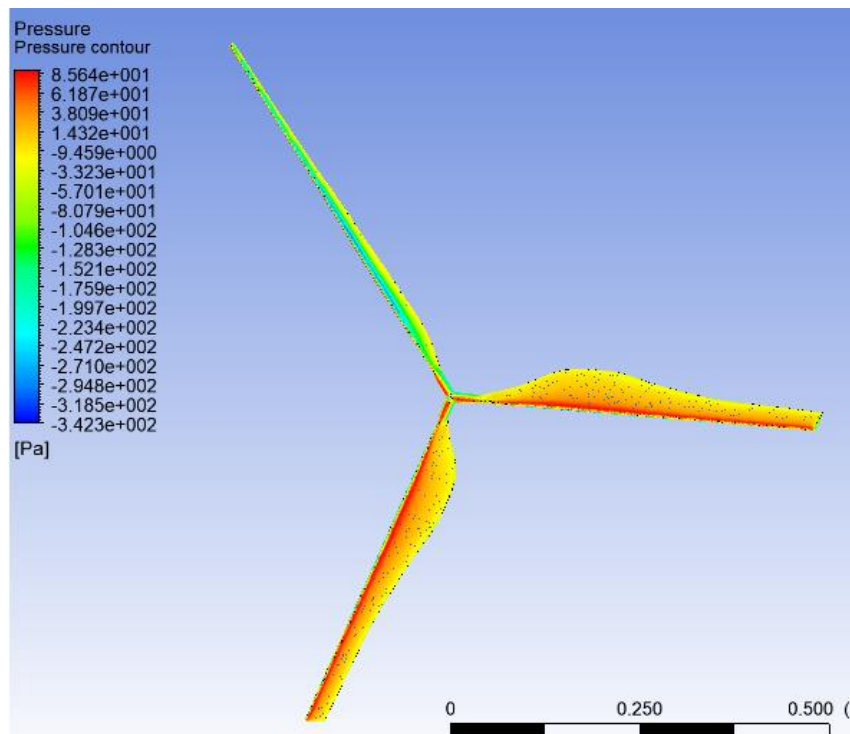


Figura 96: Perspectiva isométrica del campo de presiones en las palas

Como se puede observar en las figuras 95 y 96, esta presión solamente se puede detectar en las palas, en donde el valor máximo es 85,64 pascales y el valor mínimo es de -342,3 pascales. Este valor máximo se consigue en la cara de las palas donde el aire incide y provocan que gire el rotor, es decir, en el intradós; mientras que el valor mínimo se encuentra en el extradós, la cara de las palas donde el aire no incide y donde se produce una depresión cuando el rotor gira.

Hay que decir que estos valores obtenidos del campo de presiones son valores de presión manométricos, es decir, que el valor de presión atmosférica se ha obviado. Para calcular el valor real de la presión hay que sumar a los valores anteriores el valor de la presión atmosférica: 101325 pascales. Así mismo, tenemos que en el intradós el valor de la presión real es de 101410,64 pascales y el valor de la presión real en el extradós es de 100982,7 pascales.

En las figuras 97 y 98, se representa el campo de presiones junto con una visualización del flujo del aire para comprobar que el aumento de presión se produce en el intradós provocando que el flujo de aire gire al atravesar el rotor del aerogenerador.

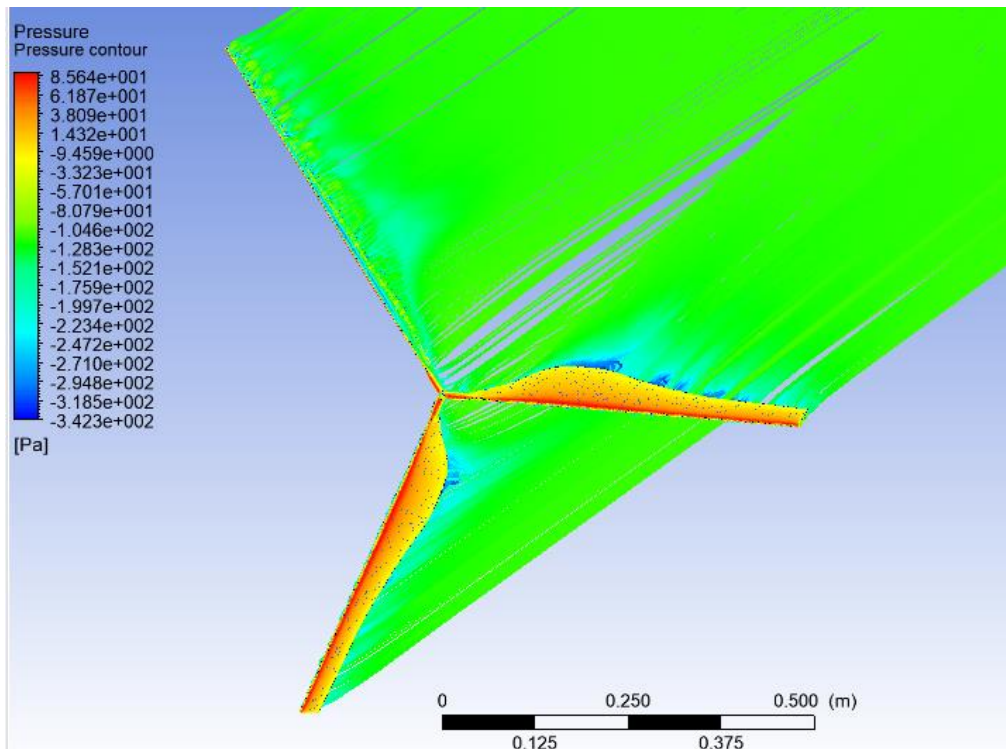


Figura 97: Campo de presiones junto con visualización de la velocidad



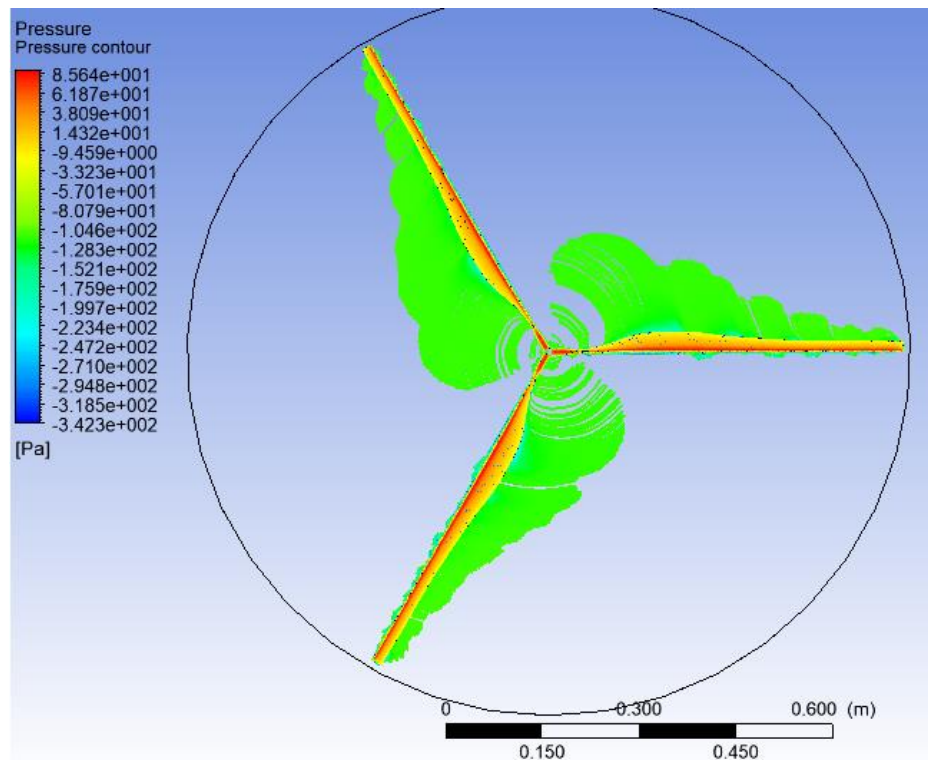


Figura 98: Imagen frontal del campo de presiones junto con giro del flujo

De los resultados de la simulación podemos obtener también una visualización de la presión aguas abajo de las palas del aerogenerador, en donde se puede observar como en la parte del fluido que se encuentra por detrás de la cara del extradós la presión disminuye con respecto a la presión atmosférica.

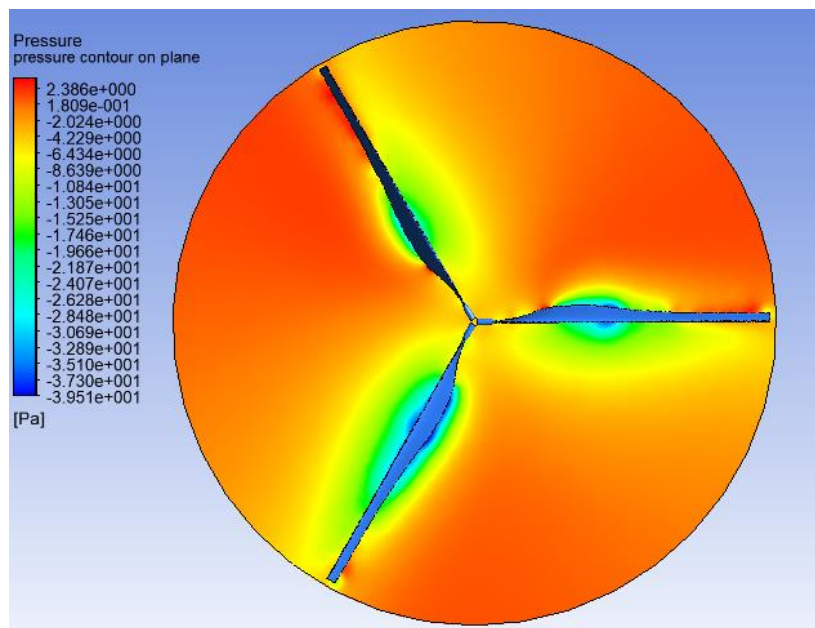


Figura 99: Presión del fluido aguas abajo del rotor

### 10.3. TURBULENCIA Y VISCOSIDAD DE TURBULENCIA

La turbulencia y la viscosidad de turbulencia son otras variables interesantes para analizar los resultados obtenidos. Al igual que la velocidad, destaca que donde más se inestabiliza el fluido es al atravesar las palas del rotor ya que es aquí donde toda la energía que lleva el fluido en su movimiento se transforma en energía para mover el rotor del aerogenerador y, por tanto, la turbulencia del fluido se eleva considerablemente.

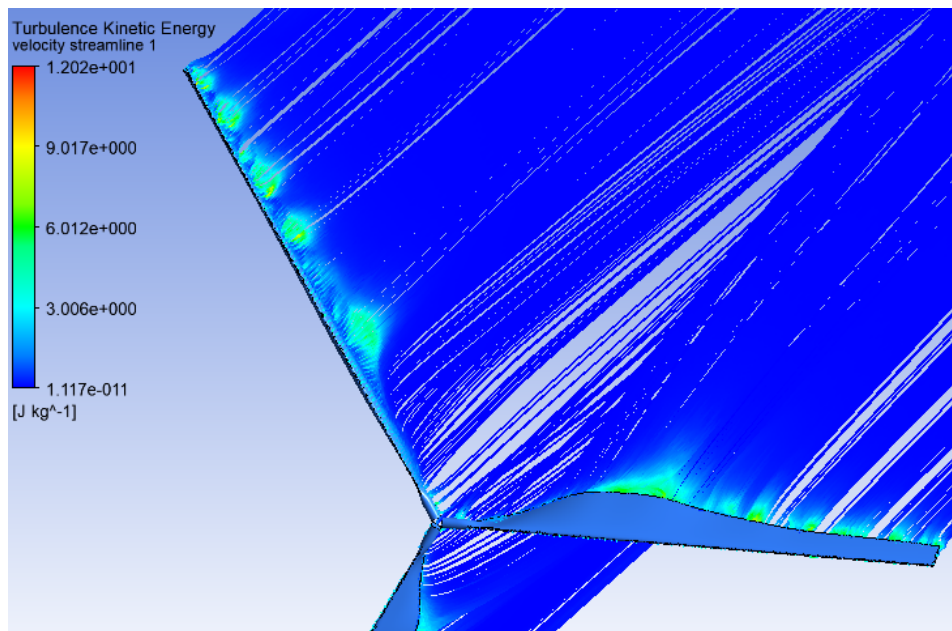


Figura 100: Turbulencia del fluido al atravesar las palas

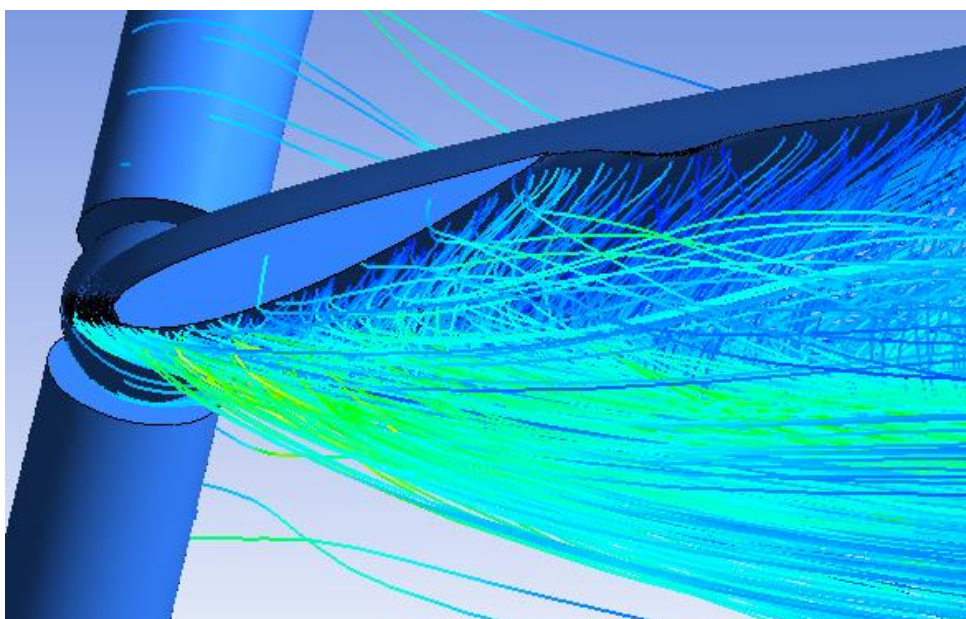
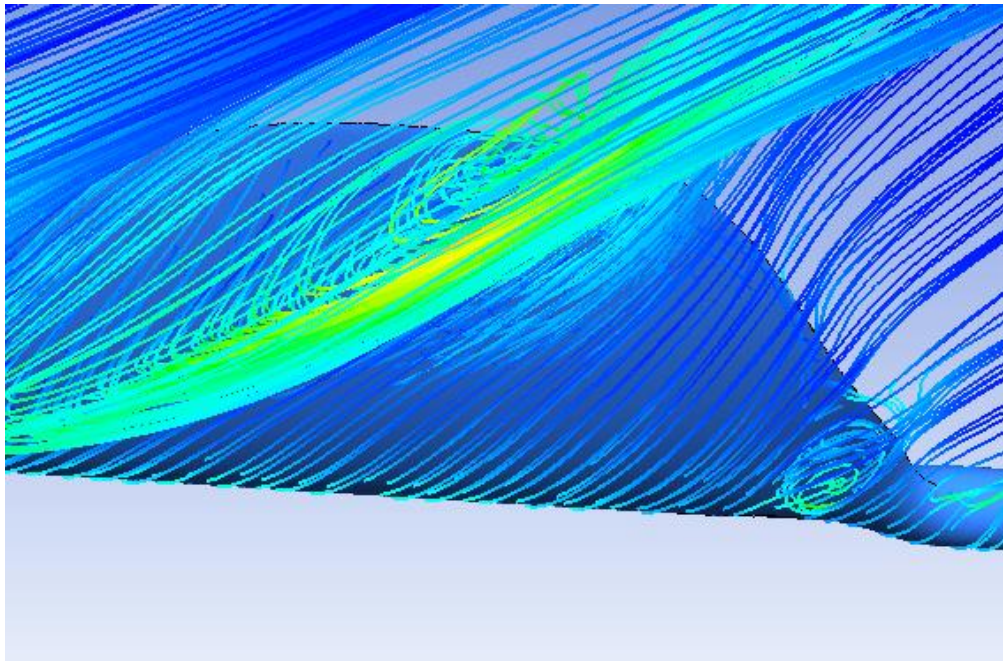


Figura 101: Desprendimiento de la capa límite



Existe, observando los resultados de la turbulencia, que estos tienen valores altos en los lugares cercanos a la pala. Se puede decir que existe un fallo de diseño ya que al tener tanto ángulo de giro la pala, existe desprendimiento de la capa límite del fluido en ciertas zonas de la pala del aerogenerador, como se puede observar en la figura 101, y que puede hacer que la pala del aerogenerador entre en pérdida aerodinámica.



*Figura 102: Turbulencia en la pala del aerogenerador*

Observando la figura 102 podemos observar como en ciertas zonas de la pala el fluido conserva el flujo laminar mientras que otros lugares existen torbellinos y un alto valor de la turbulencia.

La viscosidad de turbulencia va ligada a la turbulencia analizada anteriormente. Es por ello, que las mismas líneas de flujo representadas en la turbulencia son las que aparecen en la viscosidad de turbulencia, pero con sus valores correspondientes. Al igual que antes, las líneas de flujo cercanas a la pala disponen de valores más elevados de viscosidad que otras líneas de flujo más alejadas.

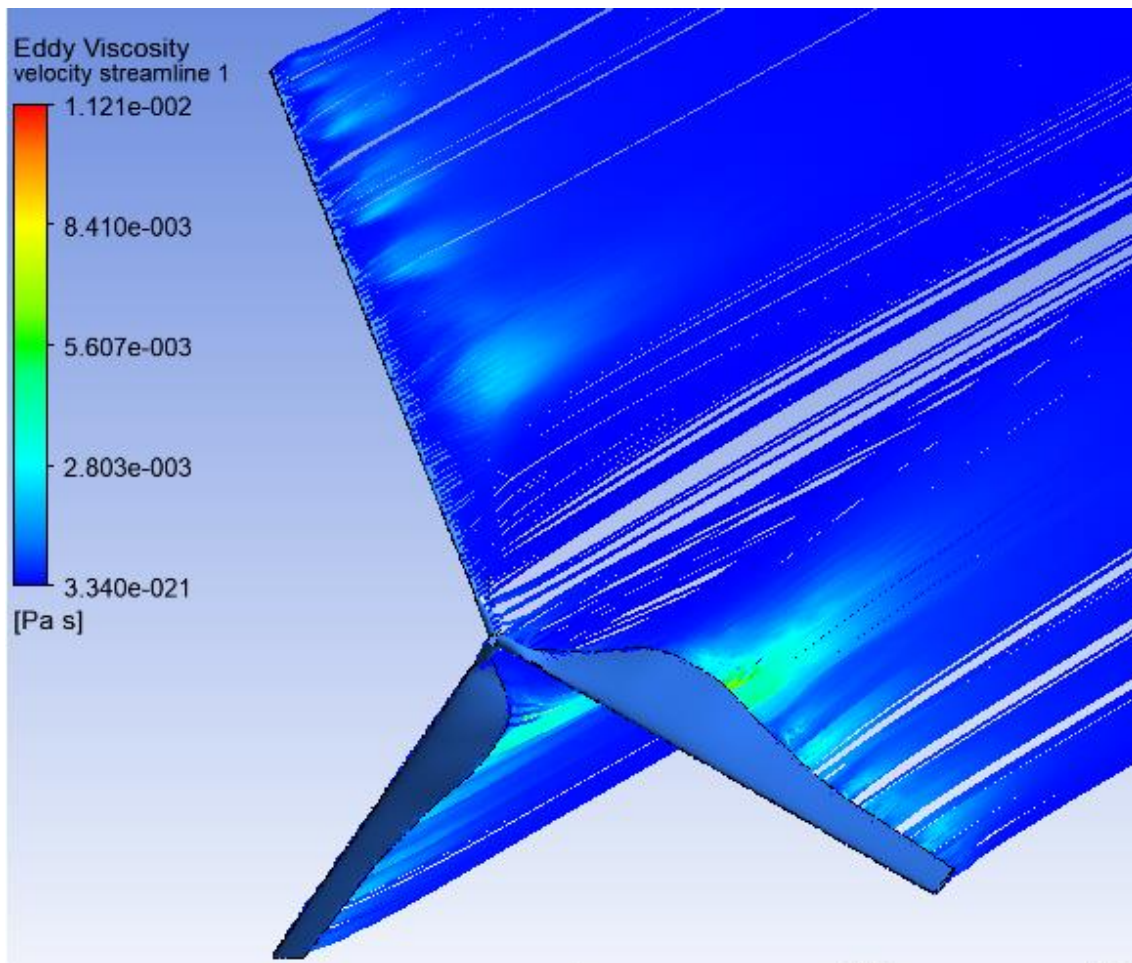


Figura 103: Valores de la viscosidad de la turbulencia

#### 10.4. FUERZAS Y MOMENTOS

Otro resultado que podemos analizar es el valor de los esfuerzos que las palas del aerogenerador deben soportar. En este apartado se incluyen los valores de las fuerzas y los momentos en diferentes direcciones del eje de coordenadas.

Para llevar a cabo la presentación de los resultados, primero debemos ver cuál es el valor por el que tenemos que multiplicar a dichos valores ya que el aerogenerador fue escalado al inicio de la simulación para facilitar la misma. Para llegar a los resultados reales de los esfuerzos hay que hacer uso del teorema  $\pi$  de Vaschy-Buckingham, el cual es el teorema fundamental del análisis dimensional. Este teorema establece que, partiendo de una relación física expresable mediante una ecuación donde están involucradas  $n$  variables, con dichas variables expresadas en términos de  $k$  cantidades físicas, se puede escribir una ecuación equivalente a la ecuación original, con una serie de  $n-k$  números adimensionales contruidos con las variables originales.

Esta simplificación llevada a cabo ha permitido que se pueda acelerar la resolución del proyecto y por ello, se hará uso del teorema  $\pi$  de Vaschy-Buckingham y de la semejanza para obtener los resultados que realmente están definiendo el comportamiento del aerogenerador. Por tanto, gracias al teorema  $\pi$  de Vaschy-Buckingham y utilizando la fórmula de  $P = F/A$ , podemos establecer que las presiones en las dos situaciones, la real y la simulada, son iguales. Por tanto, nos queda que:

$$P_1 = P_2; \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}; F_2 = F_1 * \frac{A_2}{A_1}$$

Sabiendo esto, habrá que multiplicar los valores obtenidos por la relación de las áreas que tiene las geometrías:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi * 56^2 / 4}{\pi * 0,56^2 / 4} = 10000$$

Del software *Ansys* podemos obtener los valores de los esfuerzos debidos a la presión y debido a la viscosidad del fluido. En la tabla 4 se presentan los valores de las fuerzas en diferentes direcciones del eje de coordenadas:

	Dirección	Debido a la presión	Debido a la viscosidad	Valores total del Ansys	Valor total real
Fuerzas	X	0.060725 N	0.0008190 N	0.061544 N	615.44 N
	Y	0.022887 N	-0.0002232 N	0.022664 N	226.64 N
	Z	1.710857 N	0.0673387 N	1.778196 N	17781.96 N

Tabla 4: Valores de la fuerza sobre el aerogenerador

En cuanto a los momentos, se van a reflejar los datos del momento que se produce sobre el plano del rotor (LAG), momento en la dirección del viento dominante (FLAP) y torsión a lo largo del eje de la pala, como se muestra en la imagen siguiente.

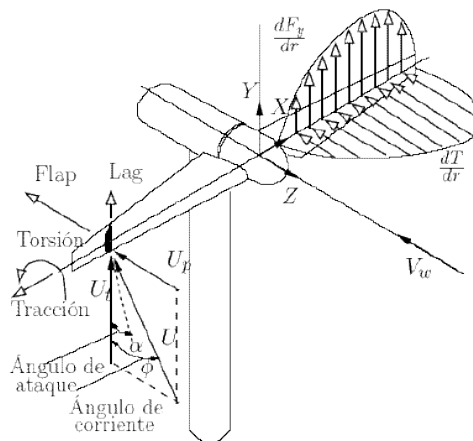


Figura 104: Distribución de cargas en las palas

Para calcular el momento LAG elegiremos en el *Ansys* que nos calcule el valor del momento cuyo centro se encuentra a 0.125 metros de X, para que coincida con la mitad de la pala y como eje del momento tomamos el eje Z. Para el FLAP tomaremos el mismo punto del eje X pero cambiaremos el eje del momento al eje Y. Por último, para la torsión a lo largo de la pala, solo cambiamos el eje del momento al eje X dejando el mismo punto establecido para el centro del momento.

	Posición y eje	Debido a la presión	Debido a la viscosidad	Valores total del <i>Ansys</i>	Valor total real
<b>Momentos</b>	LAG	1.4426 Nm	0.00356 Nm	1.43908 Nm	14390.8 Nm
	FLAP	0.22297 Nm	0.00816 Nm	0.231137 Nm	2311.37 Nm
	Torsión	0.04456 Nm	-0.00109 Nm	0.043473 Nm	434.73 N

*Tabla 5: Valores de los momentos sobre el aerogenerador*

Por tanto, la fuerza final ejercida sobre el aerogenerador vendrá dada por la fuerza en el eje Z, es decir, la fuerza de compresión que ejerce el viento sobre el aerogenerador. Las fuerzas sobre los otros ejes no tienen apenas sentido comparándola con la fuerza de compresión del viento. En cuanto a los momentos, el LAG es el que más valor tiene y tiene sentido, ya que está producido por la fuerza de compresión del viento sobre las palas.

## 11 CONCLUSIONES

---

Los resultados obtenidos concuerdan en cierto modo con lo esperado, ya que se puede ver como el aire llega a reducir alrededor de un tercio su velocidad cuando atraviesa el rotor. Por ello, podemos decir que el comportamiento del aerogenerador simulado obedece las teorías y leyes que lo gobiernan. Además, vemos que la presión no es un factor para tener en cuenta ya que los valores que se han obtenido no son significativos para llegar a provocar que el aerogenerador funcione incorrectamente.

Estos datos reflejan que el aerogenerador construido podría llegar a producir 1,17 MW, dándose estas condiciones, las cuales también hay que decir que son ideales ya que no siempre el viento circulará a una velocidad de 12 m/s. Esta velocidad, en la realidad, podrá ser mayor, provocando el paro del aerogenerador, o menor, lo que hará que la potencia obtenida sea menor.

En cuanto a la densidad, como era de esperar, no existe ningún tipo de cambio cuando el aire atraviesa el rotor. Sin embargo, la turbulencia y la viscosidad de turbulencia si se ve incrementada considerablemente cuando el aire atraviesa el rotor. Este aumento de la turbulencia se ve en parte incrementada por el ángulo que tienen las palas y que provoca que, en ciertos puntos de la misma, no se conserve el flujo laminar, llegando a crear remolinos.

Si nos fijamos en los esfuerzos que el aerogenerador debe soportar, vemos que las mayores cargas se producen por la fuerza que produce el viento sobre el rotor; y en cuanto a los momentos, el valor mayor es el momento en la dirección dominante del viento (FLAP). Es por ello que las palas deben estar hechas de materiales resistentes y a la vez ligeros para permitir que la torre sea capaz de aguantar todos los esfuerzos.

Hay que decir también que la simulación realizada podría tener ciertas variaciones en cuanto a las geometrías creadas para que la simulación se produzca, pudiendo llegar a arrojar resultados distintos. Estas variaciones son, por ejemplo, un diámetro mayor para el volumen de control ya que así podría verse, si se produjese, desprendimientos o remolinos del flujo en la punta de la pala.

Otra variación podría ser que la longitud del tramo del volumen de control aguas arriba del rotor llegase a ser menor y así evitar una creación innecesaria de la malla en esa zona y pudiendo llegar a centrar una mayor cantidad de elementos en la zona del rotor. Una variación de la longitud del volumen de control aguas abajo del control también podría darse, pero en menor medida, ya que he procedido a darle esa longitud para conseguir que el flujo se estabilice correctamente y pueda verse su comportamiento en la simulación hecha. Además, esta longitud tan enorme del volumen del control se da en la realidad en los parques eólicos en donde, dependiendo



de la potencia que vaya a tener el aerogenerador, hay que dejar entre los aerogeneradores ciertas distancias para evitar turbulencias y pérdidas de potencia. Por ejemplo, para un aerogenerador de 5 MW, el espacio óptimo entre las turbinas tiene que ser aproximadamente de 15 veces el diámetro del rotor, resultados obtenidos por Charles Meneveau, estudioso de la dinámica de fluidos de la Universidad Johns Hopkins, gracias a simulaciones informáticas a gran escala y experimentos a pequeña escala en túneles de viento.

Otro aspecto importante para tener en cuenta en la valoración de los resultados es la baja capacidad computacional de la que he dispuesto para realizar la simulación. El ordenador dispone ya de varios años y solo tiene 4 núcleos. Aunque la memoria RAM ha sido ampliada para poder conseguir cierta agilidad en la realización de la simulación, considero que puede haber sido insuficiente para llegar a obtener resultados realmente veraces y totalmente semejantes a la realidad. Esta causa es lo que ha provocado que también la geometría se haya simplificado, ya que la geometría creada en 3D contaba con la góndola, la torre, el buje y la nariz y, sin embargo, todas estas partes se han obviado para facilitar la simulación.



## 12 MEJORAS O DESARROLLOS FUTUROS

---

En este apartado se contemplarán distintos cambios a realizar en el aerogenerador que permitan obtener otros resultados o proponer cambios en la estructura de las turbinas eólicas para conseguir más potencia.

En cuanto a las mejoras a hacer en nuestro aerogenerador podemos destacar algunas propuestas:

1. A fin de conseguir distintos resultados, sería bueno probar distintos perfiles de las palas del aerogenerador y comparar cuál podría ser la mejor configuración de las mismas. Al igual que se cambian los perfiles, habría que probar también la configuración con distintos números de palas.
2. Realizar de nuevo la simulación por la dinámica computacional de fluidos, pero en este caso de todo el aerogenerador al completo para comprobar si la góndola o la torre provocan cambios en los resultados del aerogenerador.
3. A raíz del cambio de simulación anterior, sería interesante comprobar el efecto que tendría sobre la obtención de potencia si el viento soplase a sotavento, es decir, que primero incida en la góndola y luego en las palas. Esta simulación serviría para comprobar si la góndola provoca que el viento cree turbulencias o cambios de dirección que hagan que el aerogenerador no funcione de manera óptima ya que como hemos visto anteriormente, el aerogenerador, gracias al sistema de orientación, siempre encara al viento a barlovento.
4. A consecuencia de la anterior propuesta, se puede simular distintos modelos más aerodinámicos para la góndola a fin de evitar que cuando el viento sople a sotavento, se produzcan pérdidas de velocidad para el flujo del aire y con la consecuente pérdida de potencia para el aerogenerador.
5. Otro motivo interesante para simular de nuevo el aerogenerador sería comprobar que efecto existe en un parque eólico cuando existen muchos aerogeneradores obteniendo potencia eléctrica del aire. El problema de esta simulación sería la alta capacidad computacional necesaria para llevarla a cabo.
6. Realizar una prueba de cargas mecánicas de la estructura para comprobar que cargas debe aguantar la torre de cimentación en cuanto a los esfuerzos que provocan la góndola y las palas.
7. Realizar una simulación comparativa entre aerogeneradores de eje horizontal como el simulado en este proyecto y aerogeneradores de eje vertical como son el aerogenerador *Savonius* y el *Darrieus*.

Se pueden proponer algunas ideas de cómo mejorar los aerogeneradores actuales:



1. Actualmente se están desarrollando los aerogeneradores *offshore*, los cuales son los utilizados para obtener la energía eléctrica, situando las turbinas eólicas en medio de los océanos. Estos sistemas tienen la ventaja que pueden aprovechar todo el viento que fluye en los océanos y el cual es casi constante. Se ha investigado en la línea de que los aerogeneradores instalados en el océano podrían tener la palas con menor longitud, favoreciendo así que el rotor pueda girar a más velocidad. Por ello, estaría bien realizar una simulación en donde se impongan estas condiciones y ver los resultados obtenidos.
2. Realizar una simulación con los aerogeneradores *Wind Tree*, los expuestos en el apartado del estado de arte al principio de esta memoria, y serviría para observar los resultados obtenidos y sacar algunas conclusiones sobre su funcionamiento y su implementación en un futuro.





## 13 TIMELINE

---

El timeline se utiliza para estimar los tiempos empleados en realizar las numerosas tareas necesarias para la consecución del proyecto. Es un poco complejo de obtener los tiempos correctos ya que son muchas tareas a realizar y además no siempre está hecho todo a la primera, si no que a veces es necesario de varias repeticiones.

Los pasos necesarios para la realización del proyecto son los siguientes:

- Preparación y estudio inicial del proyecto.
- Búsqueda de información.
- Aprendizaje y manejo de los softwares utilizados.
- Proceso de cálculo inicial en donde se incluye tanto los cálculos numéricos como la teoría relacionada.
- Diseño de la geometría en 3D por medio de un software CAD.
- Simulación de la geometría creada por medio de un software CAE, en donde se incluye la preparación de la geometría y mallado, la preparación a la simulación imputando los valores de las variables y el proceso de simulación.
- Análisis de los resultados y obtención de conclusiones.
- Redacción de la memoria.

Hay que añadir a este punto que la realización de este proyecto por mi parte no ha sido constante y que, por tanto, existen procesos que se han demorado mucho en el tiempo. Por ejemplo, hay tareas que las he podido realizar de seguido, sin haber parones, pero hay otras, que por circunstancias no he podido realizarlas de seguido.

Además, muchos procesos se han tenido que repetir varias veces, como, por ejemplo, las simulaciones. Otro factor que alarga mucho la realización del proyecto en el tiempo es la baja capacidad computacional de la que disponía mi ordenador debido a que ya dispone de algunos años y el procesador solo tiene 4 núcleos por lo que las simulaciones duraban mucho tiempo.

Se puede observar en el diagrama de Gantt que existen tareas, como la búsqueda de la información o el proceso de cálculo inicial, que se encuentran alargadas mucho en el tiempo. Esto es debido a que durante toda la realización del proyecto he tenido que realizar cambios, que aunque no son significativos para el proyecto, sí que me ha ocupado tiempo y por ello, no se incluirán en el coste del presupuesto.

A continuación, se adjunta el diagrama de Gantt en donde se puede observar el tiempo que se ha utilizado en la realización del proyecto:

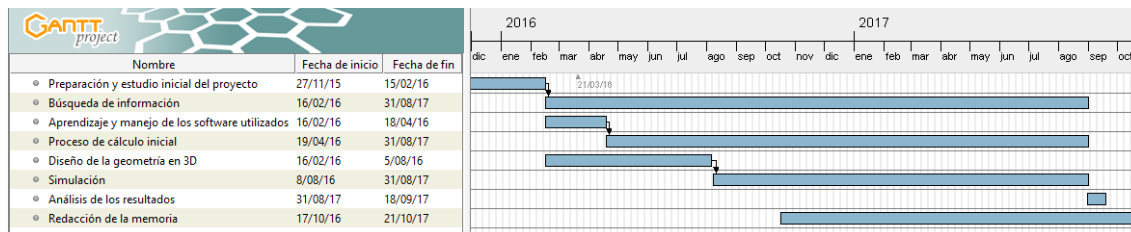


Figura 105: Diagrama Gantt

Este diagrama Gantt ha sido creado gracias al software Gantt Project, creado por Ganttproject.org y cuya licencia es GNU, es decir, que el software es gratis y de código abierto.

## 14 PRESUPUESTO

Para la realización del presupuesto es imprescindible basarse en el diagrama Gantt antes hecho, ya que una vez que se tiene el tiempo gastado, se multiplica ese tiempo por el valor de realizar dicha tarea.

En este presupuesto solo van a ser tiempos a tomar en cuenta, los tiempos que de verdad han aportado resultados al proyecto y a su resolución. Por ejemplo, los tiempos de aprender a manejar y controlar los dos softwares, tanto el CAD como el CAE, la búsqueda de información previa o las numerosas pruebas realizadas para llegar al objetivo no se van a incluir porque no son tiempos que sean relevantes para el cálculo del coste del proyecto.

Solo se van a incluir el tiempo de la simulación en el software CAE (*Ansys Fluent*), el tiempo empleado en crear las geometrías utilizadas y el tiempo en realizar los cálculos precisos para la realización del proyecto. Estos tiempos sí que se van a incluir ya que verdaderamente son los que aportan información de la duración de un proyecto así. Esto se hace para intentar asemejarlo a la realización de este tipo de proyectos dentro del sector industrial, en donde la persona que lo realice ya dispondrá de conocimientos suficientes y de herramientas de computación mucho más potentes que la que se ha utilizado para la simulación de este aerogenerador, con lo que el tiempo también se ve reducido en ese sentido.

En la siguiente tabla puede verse la cantidad de horas utilizadas para la realización de las diferentes tareas del proyecto. Cabe decir que puede ser que algunas cantidades no sean las exactas, pero pueden darnos un valor aproximado del tiempo empleado.

Tarea	Tiempo total en horas	Tiempo laborable en días
Cálculos previos	25	3,125
Diseño 3D	120	15
Simulación CFD	220	27.5
Análisis de resultados	20	2,5
Conclusiones	4	0,5
Tiempo total	389	48.625

Tabla 6: Tiempos del proyecto

En cuanto al coste en personal, hay que añadir al presupuesto el tiempo que está una persona cualificada trabajando en la preparación, en el diseño y en la simulación del aerogenerador. Para ello se ha supuesto que un ingeniero ha estado trabajado 8 horas diarias. Por tanto, el coste de mano de obra será los días que se ha tardado en realizar el proyecto por el coste diario. Hay que tener en cuenta que no todo el tiempo



que dura el proyecto, el ingeniero está trabajando ya que cuando se está realizando la simulación, el ingeniero no tiene que intervenir.

Para ello debemos consultar cuál sería el salario que un ingeniero debe percibir por realizar dicho trabajo. Poniendo un salario medio de 1800 euros, trabajando 8 horas diarias con 21 días laborables al mes, horas normales para un trabajador de la industria, sale un coste diario por tener a un ingeniero simulando de 85,71 € al día, que viene a ser 10,71 € por hora. [16]

En este apartado, aunque solo se pone como si trabajara un ingeniero, existen distintas ocupaciones que en la vida real puede que las realicen personas distintas pero que en este caso es la misma. Por ello, en la siguiente tabla se observa el resumen de tareas, tiempos y costes de la simulación:

Tarea	Tiempo en días	Coste en €/día	Coste total en €
Cálculos previos	3,125	85,71	267,84
Diseño 3D	15	85,71	1285.65
Simulación CFD	27.5	85,71	2357.03
Análisis de resultados	2,5	85,71	214,27
			4124.79

*Tabla 7: Costes de las tareas del proyecto*

El siguiente punto es el análisis del coste del soporte utilizado. En este punto hay que incluir los recursos utilizados para la resolución del proyecto, es decir, el ordenador utilizado para realizar el diseño, la simulación y la redacción de la memoria y, por otro lado, los softwares utilizados para crear y simular el aerogenerador.

Para el cálculo del coste, se tiene que poner el precio del ordenador y de los softwares utilizados. Sin embargo, el ordenador tiene más de 5 años y no sería correcto incluir ese coste cuando la máquina está ya amortizada.

También, los softwares utilizados son las versiones de estudiante porque el coste de los mismos era 0 euros, y se han elegido estas versiones de estudiante porque eran capaces de satisfacer las necesidades de diseño y simulación CFD. Por ello, como coste de equipos y softwares utilizados no se va a añadir nada al presupuesto.

Estas versiones de softwares de estudiantes han sido descargadas de los siguientes enlaces:

- Solid Works Student Edition:  
<https://www.solidworks.es/sw/education/mechanical-engineering-student-software.htm>

- Ansys Fluent: <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>

El último punto a analizar es el coste energético. Aquí se incluyen toda la electricidad utilizada para alimentar los equipos usados, ya sea el ordenador, las luces y la climatización de la habitación donde el proyecto ha sido realizado. Todo este coste energético solo se considera haciendo uso del horario antes indicado de 8 horas diarias y 21 días laborables.

Para el cálculo de este coste se ha consultado la web de *Endesa* para ver cuál es el precio de la electricidad y se ha supuesto un precio medio de la electricidad de 0,12 €/kWh. En la siguiente tabla se encuentra resumido cuál es el coste energético: [17]

Equipo	Coste de la electricidad (€/kWh)	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Coste (€)
Portátil	0,12	0,05	2,32*21*8	2,34
Iluminación	0,12	2*0,008	2,32*21*8	0,74
Climatización	0,12	0,050	2,32*21*8	2.34
				5.42

Tabla 8: Costes en electricidad

Por último, hay que aunar todas estas cantidades para ver cuál es la cantidad total que nos ha costado realizar el proyecto:

Concepto	Coste (€)
Gasto Electricidad	5.42
Soporte (Equipos)	0
Tareas TFG	4124.79
Costes indirectos (10%)	412.48
Total Bruto	4542.69
Total Neto (IVA 21%)	5496.65

Tabla 9: Coste total del proyecto



## 15 BIBLIOGRAFÍA

---

### ➤ Publicaciones

1. Cruz, Ignacio, “El futuro de la energía: Avances tecnológicos y perspectivas de la energía eólica”, CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), Valladolid, 2012
2. Escáñez Busquets, David, “Diseño y fabricación de los álabes de un micro-aerogenerador de baja potencia”, Universitat Politècnica de Catalunya, Febrero, 2013
3. Nistal Lastra, Juan, “Modelado y control dinámico de un Aerogenerador”, Universidad de Cantabria, Enero 2015
4. Torres Morimitsu, Daniela, “Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia”, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2015
5. Frago Medina, Omar Alfredo, “Simulación numérica del rotor de un aerogenerador de eje vertical”, Universidad Nacional Autónoma de México, Enero, 2012
6. Álvarez, Clemente, “Energía eólica”, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, 2006
7. Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, 2011
8. The Boston Consulting Group, “Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables, Estudio Técnico PER 2011-2020”, Madrid, 2011
9. Gómez García, Víctor, “Estudio computacional de una turbina eólica de eje vertical H-Darrieus con perfiles NACA 4518”, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales, Septiembre, 2015
- Richmond-Navarro, Gustavo, “Desempeño de turbinas eólicas Magnus de eje horizontal en función de sus variables geométricas y cinemáticas”, Tecnología en Marcha, Vol. 29, Nº1, Enero-Marzo, Pág. 3-50
- Baldomero, Mauricio Pablo, “Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces”, Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Pub. Esp. Nº 4, 1 de Noviembre – 31 de diciembre, 2012, Pág. 617-623

### ● Página Web

10. “Eکیدom S.L.”. [www.ekidom.com](http://www.ekidom.com) (2017, 15 Agosto)
11. “Ammonit”. [www.ammonit.com](http://www.ammonit.com) (2017, 18 Abril)
12. “Wikipedia”, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) (2017, 17 Septiembre)
13. “Renovables verdes”, [www.renovablesverdes.com](http://www.renovablesverdes.com) (2017, 1 Septiembre)



14. "Componentes de un aerogenerador", [www.energiadoblezero.com](http://www.energiadoblezero.com) (2016, 19 Noviembre)
15. "Las palas de los aerogeneradores", [www.opex-energy.com](http://www.opex-energy.com) (2017, 20 Agosto)
16. "Tu salario", [www.tusalario.org](http://www.tusalario.org) (2017, 13 Agosto)
17. "Endesa", [www.endesaclientes.com](http://www.endesaclientes.com) (2017, 14 Agosto)
  - "MIT Technology Review", [www.technologyreview.es](http://www.technologyreview.es) (2017, 11 Julio)
  - "Cálculo y diseño de Aerogenerador HAWT", [www.jasf1961.wordpress.com](http://www.jasf1961.wordpress.com) (2017, 3 Junio)
  - "Danish Wind Industry Association", [www.windpower.org](http://www.windpower.org) (2017, 3 Marzo)
  - "Como hacer un aerogenerador", [www.wikihow.com](http://www.wikihow.com) (2016, 4 Mayo)
  - "Universidad de la Rioja", [www.unirioja.es](http://www.unirioja.es) (2017, 20 Agosto)



## 16 ANEXO PLANOS

---



D

D

C

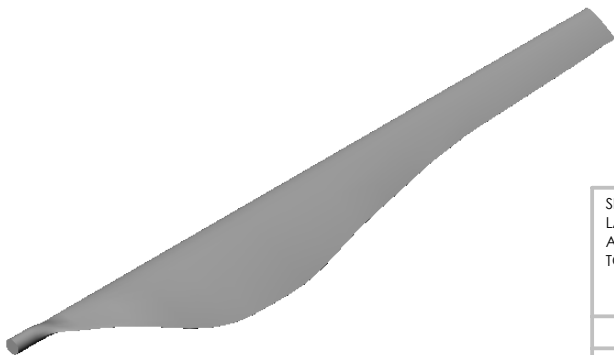
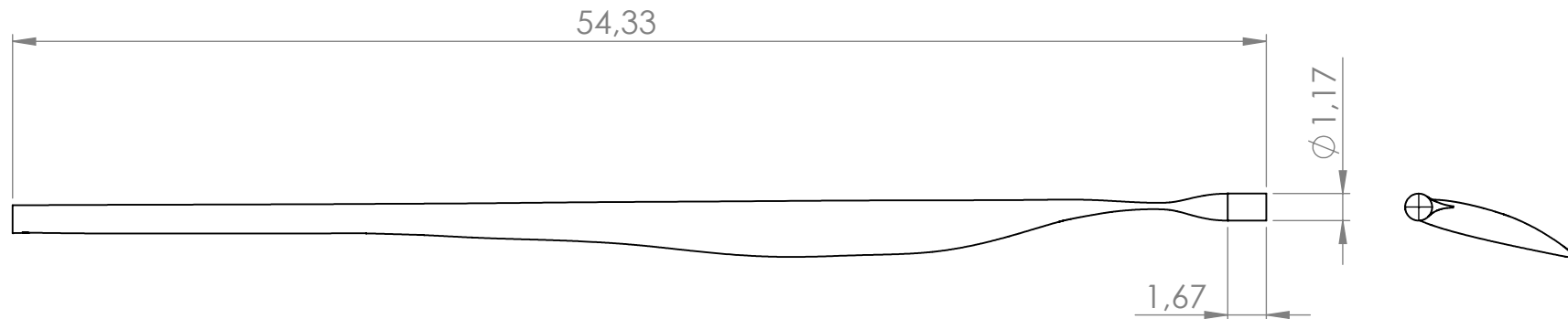
C

B

B

A

A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
								Cotas en metros	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA					TÍTULO: Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3D de dinámica computacional de fluidos	
DIBUJ.	Juan Fco Rodríguez		20/10/2015						
VERIF.	Juan Fco Rodríguez		20/10/2015						
APROB.	Juan Fco Rodríguez		20/10/2015						
FABR.								N.º DE DIBUJO Alabe 2415	
CALID.									
								ESCALA:1:500	
								HOJA 1 DE 1	

6

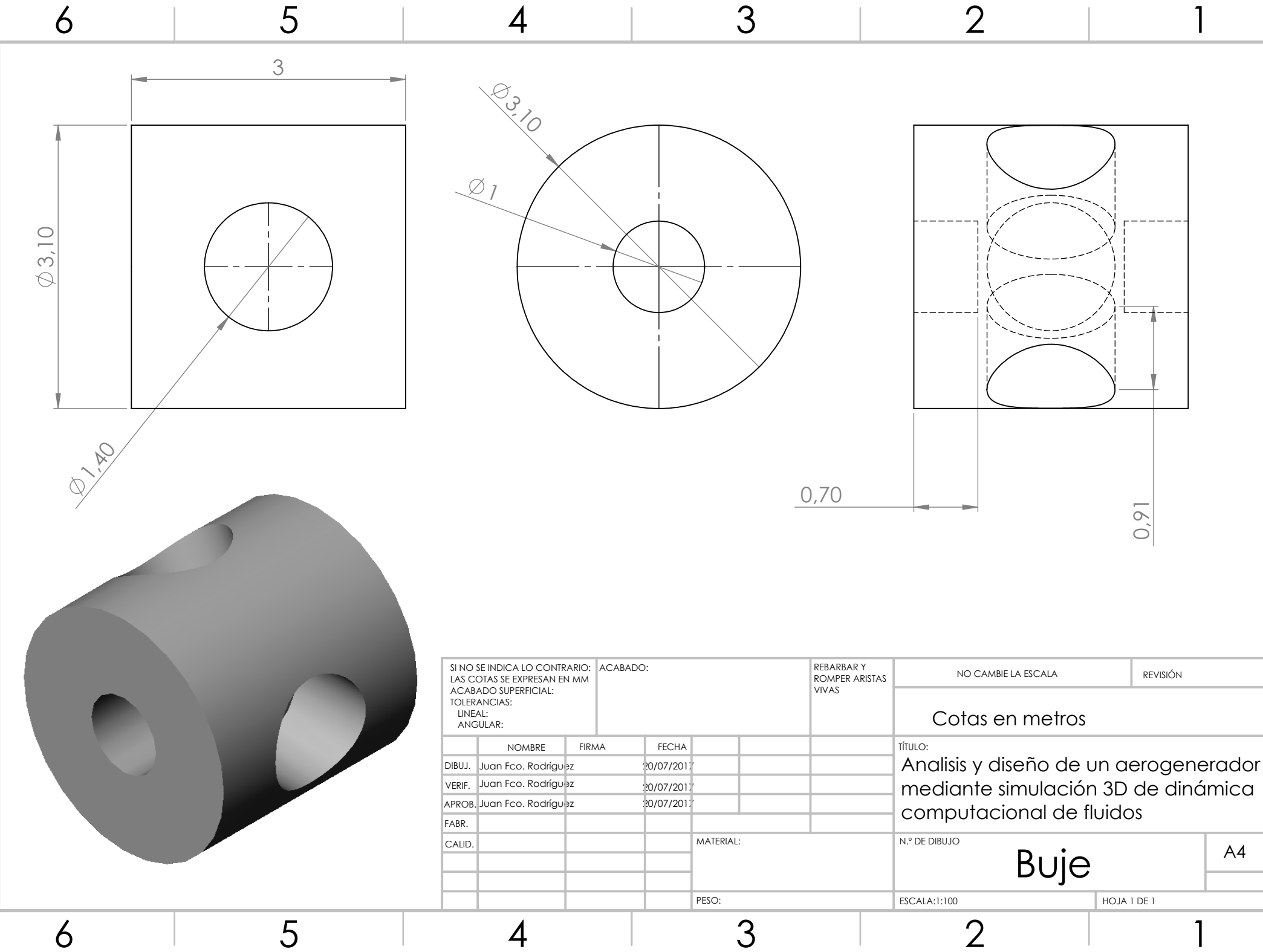
5

4

3

2

1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
								Cotas en metros			
								TÍTULO:			
								Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3D de dinámica computacional de fluidos			
								N.º DE DIBUJO		A4	
								Buje			
								ESCALA:1:100		HOJA 1 DE 1	

D

C

B

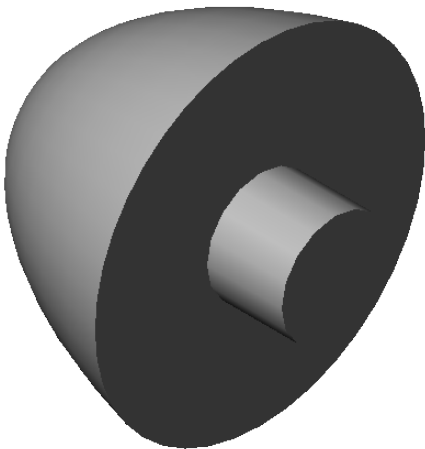
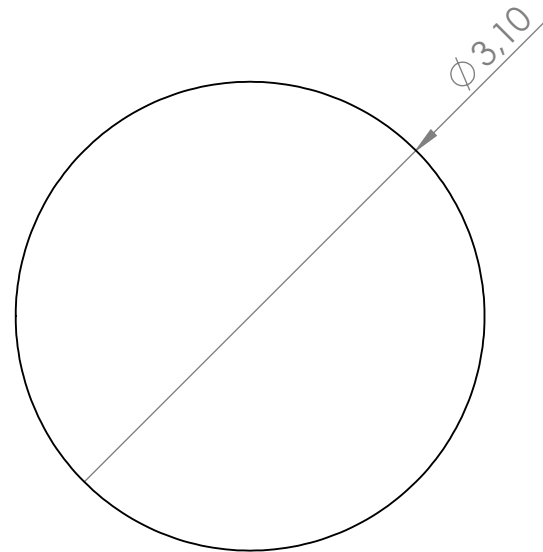
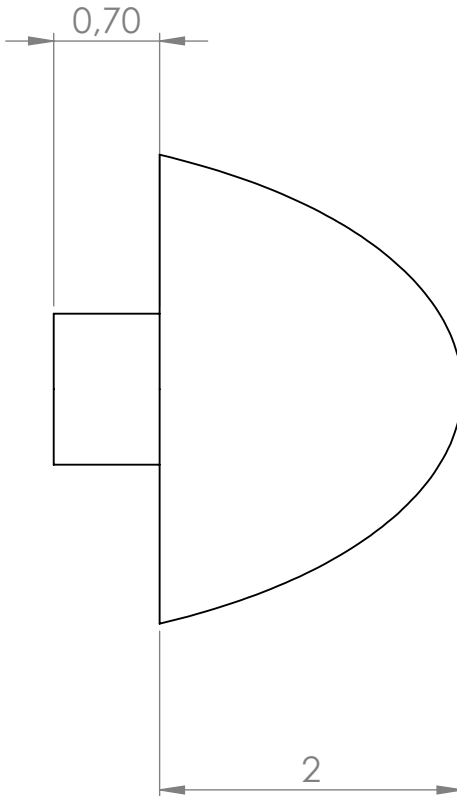
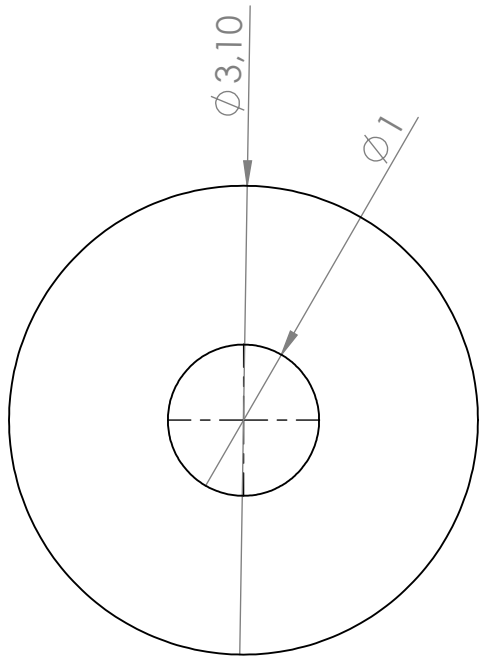
A

D

C

B

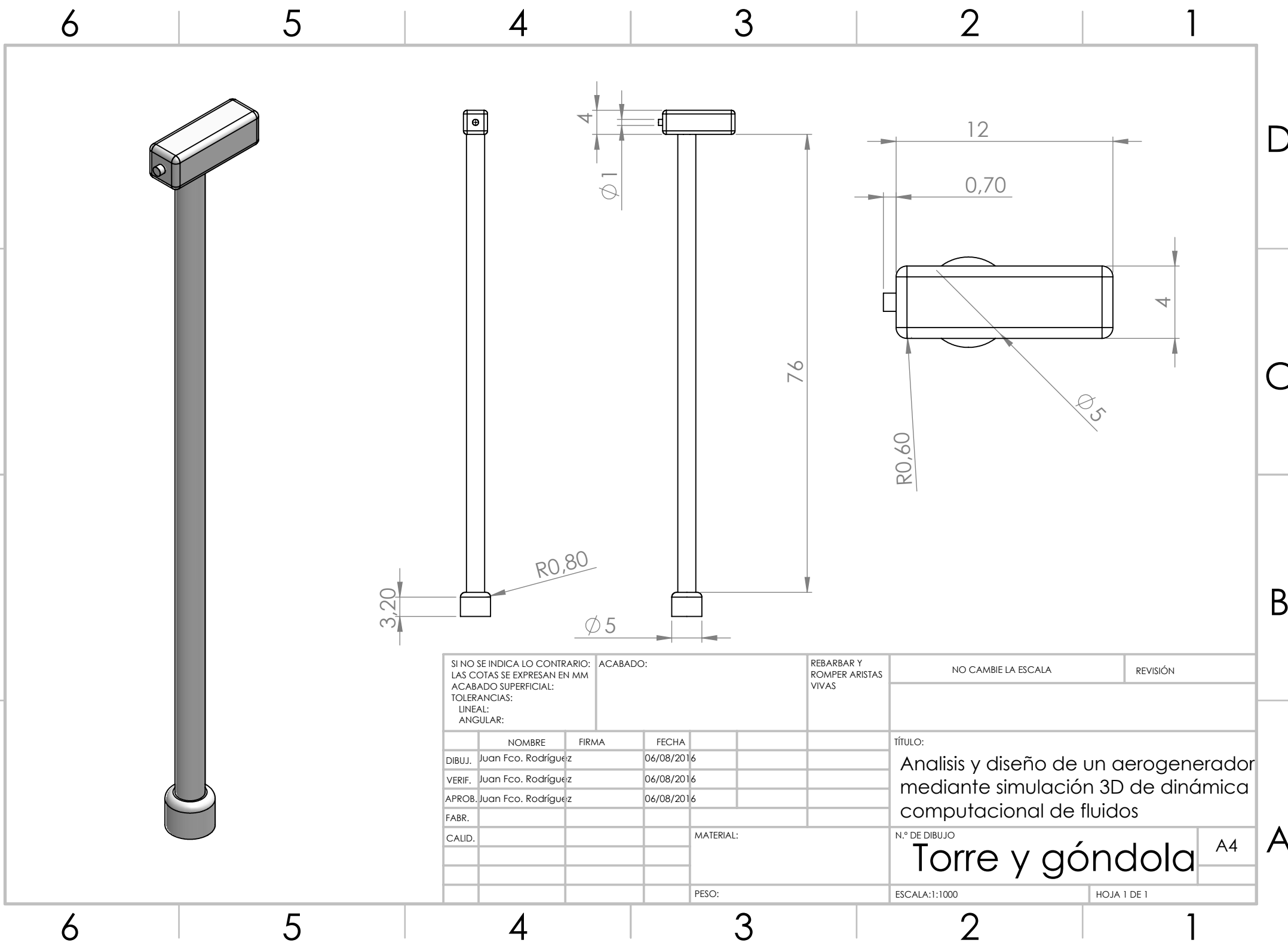
A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA			TÍTULO:  Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3D de dinámica computacional de fluidos					
DIBUJ.	Juan Fco. Rodríguez		27/08/2015								
VERIF.	Juan Fco. Rodríguez		27/08/2015								
APROB.	Juan Fco. Rodríguez		27/08/2015								
FABR.						N.º DE DIBUJO  Nariz					
CALID.				MATERIAL:							
				PESO:		ESCALA:1:100				HOJA 1 DE 1	

Nariz

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
	NOMBRE		FIRMA		FECHA				TÍTULO:  Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3D de dinámica computacional de fluidos			
DIBUJ.	Juan Fco. Rodríguez				06/08/2016							
VERIF.	Juan Fco. Rodríguez				06/08/2016							
APROB.	Juan Fco. Rodríguez				06/08/2016							
FABR.									N.º DE DIBUJO  Torre y góndola			
CALID.							MATERIAL:					
							PESO:		ESCALA:1:1000		HOJA 1 DE 1	